

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

**Fakulta strojní**

**Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie**

**Technologie výroby rybinové drážky na hřídeli v hlavici vřetena**

**Production technology dovetail grooves on the shaft of the spindle head**

**Student:**

**Bc. Ondřej Kohut**

**Vedoucí diplomové práce:**

**doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

**Ostrava 2017**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Kohut**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Technologie výroby rybinové drážky na hřídeli v hlavici vřetena**  
**Production Technology Dovetail Grooves on the Shaft of the Spindle Head**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše technologie výroby rybinových drážek.
2. Analýza současného stavu výroby rybinových drážek v podmínkách Vítkovice heavy machinery, a.s.
3. Návrh a realizace výroby rybinové drážky na hřídeli v hlavici vřetena.
4. Návrh a realizace měření rybinové drážky na hřídeli v hlavici vřetena.
5. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

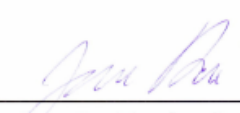
- [1] AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Překl. M. Kudela. 1. vyd. Praha : Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
- [2] BRYCHTA, J.; CZÁN, A.; ČEP, R.; KRATOCHVÍL, J.; PETRŮ, J.; SADÍLEK, M.; STANČEKOVÁ, D.; ZLÁMAL, T. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Žilinská Univerzita v Žilině, 173 s., 2014, ISBN 978-80-248-3522-8.
- [3] EL-HOFY, H. *Advanced Machining Processes – Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. The McGraw-Hill Companies, 2005, ISBN 0-07-145334-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15. 5. 2017

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15. 5. 2017

podpis

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Raškovice 470, 73904

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

KOHUT, O. *Technologie výroby rybinové drážky na hřídeli v hlavici vřetena*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 55 s. Vedoucí práce: Sadílek, M.

Diplomová práce se zabývá problémem výroby rybinové drážky v hlavici vřetene na hřídeli. Úkolem je navrhnout způsob výroby takovým způsobem, aby byla dodržena požadovaná přesnost, s ohledem na přijatelnou produktivitu samotné výroby. V počáteční fázi diplomové práce budou obecně popsány současné trendy výroby rybinových drážek, jednak obecně ve strojírenství a dále pak v podniku Vítkovice Heavy Machinery a.s. Hlavní část práce se zaměřuje na návrh konkrétního řešení pro výrobu rybinové drážky a následnou realizace vhodného řešení. Diplomová práce dále obsahuje návrh a realizaci metrologické kontroly a závěrečné zhodnocení přesnosti a efektivity výroby.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

KOHUT, O. *Production technology dovetail grooves on the shaft of the spindle head* . Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2017, 55 s. Thesis head: Sadílek, M.

The thesis deals with problem of production dovetail groove on the shaft of the spindle head. The challenge is propose a method of manufacturing with regard on required precision and acceptable productivity of production. In the initial of the thesis we acquainted with current trends in production dovetail grooves, generally first and then in the company Vítkovice Heavy Machinery Inc. Main part of the master thesis focuses on propose specific solution for manufacturing dovetail groove and subsequent implementation of suitable solution. The thesis also includes the design and implementation of metrological control and final evaluation of accuracy and production efficiency.

## Obsah

1	Rešerše technologie výroby rybinových drážek .....	9
1.1	Technologie výroby rybinových drážek .....	10
1.2	Drážky – základní rozdělení .....	10
1.3	Rybinové drážky .....	11
1.4	Výroba rybinových drážek.....	12
1.5	Měření a kontrola.....	14
2	Analýza současného stavu výroby rybinových drážek v podmínkách Vítkovice Heavy Machinery a.s. ....	16
3	Návrh a realizace výroby rybinové drážky na hřídeli v hlavici vřetena .....	20
3.1	Popis součástí a umístění rybinové drážky .....	20
3.2	Návrh výroby rybinové drážky .....	22
3.2.1	Hrubování drážky .....	23
3.2.2	Dokončování rybinové drážky varianta 1 .....	24
3.2.3	Dokončování rybinové drážky varianta 2.....	25
3.3	Rámcový technologický postup výroby hřídele .....	28
3.4	Realizace výroby rybinové drážky dle varianty 2 .....	29
3.4.1	Ustavení hřídele .....	30
3.4.2	Hrubování drážky .....	32
3.4.3	Frézování úhlového vybrání .....	34
3.4.4	Dokončování drážky.....	37
4	Návrh a realizace měření rybinové drážky na hřídeli v hlavici vřetena.....	40
4.1	Návrh a realizace měření pravoúhlé drážky .....	40
4.2	Návrh a realizace měření rybinové drážky – kontrola tvaru.....	44
4.3	Návrh a realizace měření rybinové drážky – kontrola šířky .....	47
5	Závěry pro realizaci v praxi .....	51
	Použitá literatura .....	53

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	šířka vnější rybinové drážky přes válečky [mm]
B	šířka vnější rybinové drážky [mm]
D	průměr drážky [mm]
$\bar{D}$	výběrový aritmetický průměr měření průměru drážky [mm]
$D_i$	průměr drážky při jednotlivých měřeních [mm]
DIN	Deutsche Industrie-Norm (německá národní norma)
$D_n$	průměr frézy [mm]
HSS	High Speed Steel (rychlořezná ocel)
ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro standardizaci)
$R_a$	průměrná aritmetická odchylka profilu [ $\mu\text{m}$ ]
VBD	vyměnitelná břitová destička
VHM	Vítkovice Heavy Machinery a.s.
Obr.	Obrázek
$S_{(\bar{a})}$	Směrodatná odchylka šířky rybinové drážky [mm]
$S_{(\bar{b})}$	Směrodatná odchylka šířky pravoúhlé drážky [mm]
$S_{(\bar{D})}$	Směrodatná odchylka průměru drážky [mm]
a	šířka rybinové drážky přes válečky [mm]
$\bar{a}$	výběrový aritmetický průměr šířky rybinové drážky [mm]
$a_e$	šířka frézování [mm]
$a_i$	šířka rybinové drážky při jednotlivých měřeních [mm]
$a_p$	hloubka třísky [mm]
a.s.	akciová společnost
b	šířka rybinové drážky [mm]
$\bar{b}$	výběrový aritmetický průměr měření pravoúhlé drážky [mm]
$b_i$	šířka pravoúhlé drážky při jednotlivých měřeních [mm]
d	průměr kontrolních válečků [mm]
$f_z$	posuv na zub [mm]
k	koefficient pravděpodobnosti
n	otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]
$n_i$	počet měření
p	pravděpodobnost výsledků [%]

$u_{Ai}$	nejistota typu A pro jednotlivá měření [mm]
$u_{Bi}$	nejistota typu B pro jednotlivá měření [mm]
$u_{ci}$	kombinovaná standartní nejistota pro jednotlivá měření [mm]
$u_i$	rozšířená nejistota pro jednotlivá měření [mm]
$v_c$	řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
$v_f$	posuv [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
$x$	vzdálenost od středu kontrolního válečku k okraji drážky [mm]
$z$	počet zubů frézy
$\alpha$	úhel sklonu boku rybinové drážky [ $^\circ$ ]
$\Delta i$	odchylka od aritmetického průměru při jednotlivých měřeních [mm]
$\emptyset$	průměr [mm]



## **1 Rešerše technologie výroby rybinových drážek**

Tato diplomová práce je zpracována pro společnost Vítkovice Heavy Machinery a.s., (dále jen VHM), která je členem skupiny Vítkovice Machinery Group. Skupina Vítkovice Machinery Group je jednou z nejvýznamnějších strojírenských společností v České Republice a zahrnuje více než třicet firem. Společnost Vítkovice Heavy Machinery se zaměřuje převážně na výrobu těžkých ocelových odlitku, tvarových opracovaných výkovku a montážních celků jako např. lisů.

Hlavní problematikou této práce je právě výroba velké strojní součástí určené pro těžký průmysl. Jedná se o hřídel sloužící pro přenos kroutícího momentu, která je na obou stranách zakončena hlavicí vřetene. Práce se nezaměřuje na výrobu jako celek, ale pouze na část výrobního procesu a to konkrétně na výrobu a následnou kontrolu rybinové drážky. Přičemž rybinová drážka je situována v jedné z hlavic vřetene.

Samotná výroba rybinové drážky není ve strojírenské výrobě ničím neobvyklým. Jedná se o poměrně jednoduchou a dobře zmapovanou výrobní oblast. Různými způsoby výroby rybinových drážek se zabývá úvodní část diplomové práce. Nicméně skutečným problémem je v tomto případě umístění drážky, které bude dále v práci podrobně popsáno a graficky znázorněno.

Nejprve budou uvedeny teoretické poznatky z oblasti výroby rybinových drážek. Následovat bude krátká analýza současného stavu výroby rybinových drážek v podmínkách společnosti Vítkovice Heavy Machinery. Dále je specifikován návrh konkrétního řešení na výrobu zadané součásti a návrh metrologické kontroly vyrobené drážky.

Cílem práce je navrhnout takové řešení, které zajistí výrobu rybinové drážky s požadovanou přesností při akceptovatelných výrobních nákladech, s využitím stávajícího strojního zařízení.

## 1.1 Technologie výroby rybinových drážek

Drážky obecně, jsou důležitým konstrukčním prvkem, uplatňovaným v celém průmyslovém odvětví na velice široké škále výrobků. Při volbě technologie na výrobu drážek je zapotřebí zohlednit řadu faktorů, ty nejdůležitější jsou například: tvar drážky, požadovaná přesnost, materiál obrobku, a také ekonomické faktory jako objem nebo pružnost výroby.

## 1.2 Drážky – základní rozdělení

Samotných typů drážek je velké množství a využívají se k různým účelům. Typickým využitím drážek, je například získání pevného rozebíratelného spoje náboje s hřídelí.

Základní rozdělení drážek se provádí z hlediska jejich tvaru: [3]

### a) Pravoúhlé

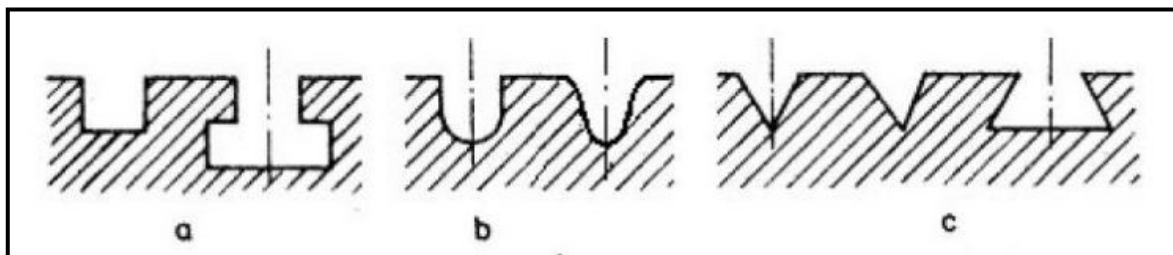
- tvaru U
- tvaru T

### b) Tvarové

- rádiusové
- modulové

### c) Úhlové

- souměrné
- nesouměrné
- rybinové



Obr. č. 2.1 – Typy drážek, a) pravoúhlé, b) tvarové, c) úhlové [3]

Z hlediska průběhu drážky je možno tyto drážky dále rozdělit na:

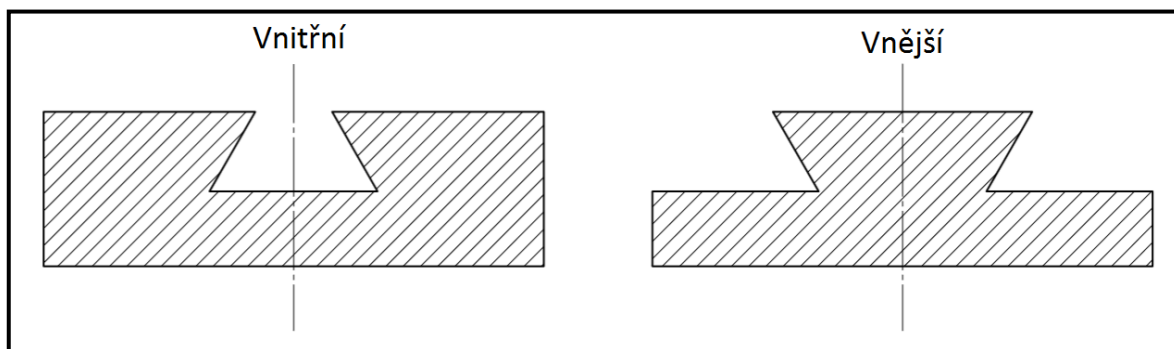
- Rovné
- Šroubovité
- Speciální

Z předchozího rozdělení vyplývá, že drážku popisovanou v této diplomové práci lze zařadit mezi úhlové, respektive rybinové speciální drážky.

### 1.3 Rybinové drážky

Rybinové drážky jsou drážky úhlové, jejichž plochy svírají jiný úhel, než  $90^\circ$ . Z hlediska jejich konstrukce jsou rozdělovány:

- vnitřní rybinové drážky,
- vnější rybinové drážky.

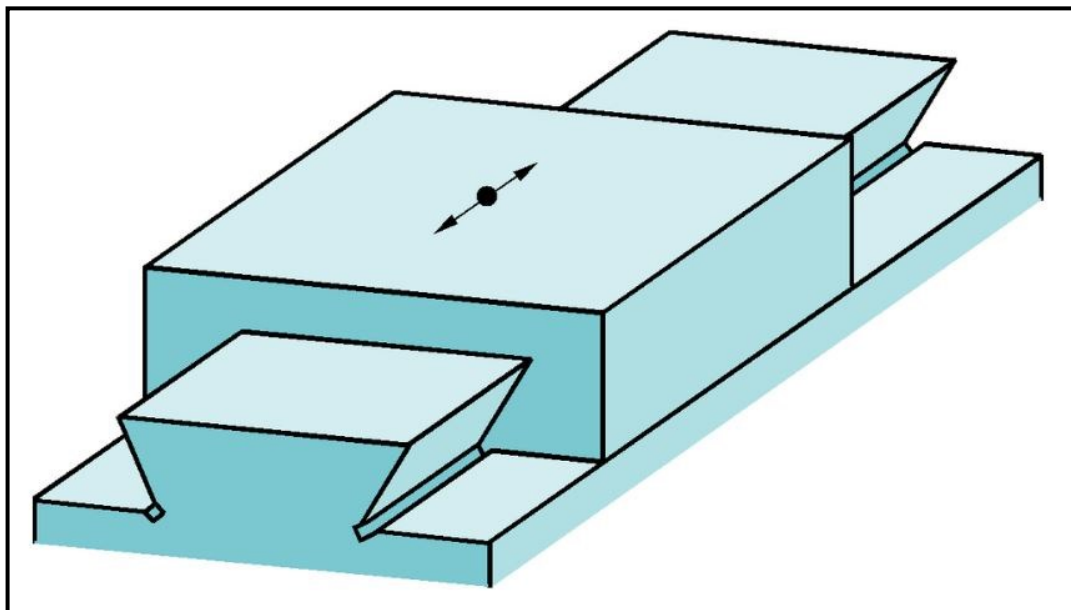


Obr. č. 2.2 – Rybinové drážky

Rybinových drážek a obecně rybinových spojů se nejčastěji využívá při práci se dřevem. Zejména pak v truhlářství, při výrobě nábytku, popřípadě stavebnictví, pro výrobu různých druhů dřevěných konstrukcí. Rybinové spoje při práci se dřevem se využívají především jako náhrada čepových spojů, a to pro jejich zvýšenou odolnost proti namáhání a vyšší pevnost ve všech směrech.

Ve strojírenství se rybinových spojů využívá především pro zajištění vzájemné polohy strojních součástí. Takovéto rybinové spoje pak nezajišťují pevné, ale naopak pohyblivé spojení dvou strojních součástí. Spojení pomocí rybinové drážky odebírá pět stupňů volnosti, což v důsledku znamená, že zbývá jeden stupeň, který nám dovoluje přímočarý pohyb ve směru osy rybinové drážky. Ve velké míře se tohoto mechanismu využívá

například při konstrukci vedení pohybových částí obráběcích strojů. Schéma takového vedení je vidět na následujícím obrázku.



Obr. č. 2.3 – Rybinové vedení [4]

#### 1.4 Výroba rybinových drážek

Postup při výrobě rybinových drážek záleží především na umístění samotné drážky na součásti, a na možnostech obráběcího stroje. Z hlediska odlišnosti výroby lze rozlišit dva základní druhy rybinových drážek:

- přímé vodící rybinové drážky,
- rybinové drážky na hřídeli.

##### a) Přímé, vodící rybinové drážky

Obecný postup výroby vnitřních, přímých rybinových drážek, (takovou drážku lze pozorovat např. na obrázku č. 2.3) je popsán následovně:

Drážkovací frézou se vytvoří pravoúhlá drážka požadované hloubky. Dále se pokračuje způsobem, že se rozjedou boky drážky uhlovou frézou, dokud nevznikne rybinová drážka požadovaných rozměrů, je nutné použít úhlovou frézu s takovým sklonem ostří, který odpovídá zamýšlenému úhlu rybinové drážky. Při výrobě je zapotřebí pravidelné kontroly a měření, v závislosti na požadovaném stupni přesnosti, obzvláště důležitá je kontrola rovnoběžnosti boků. Ve většině případů je pak posledním úkonem vytvoření odlehčení na dně drážky. Toto opatření se provádí za účelem eliminace styčných

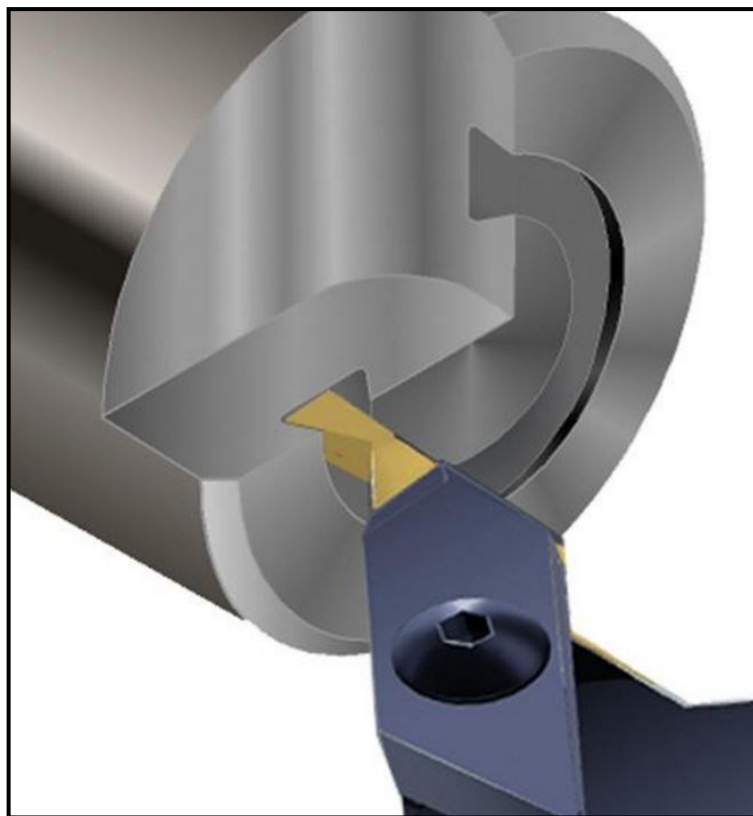
ploch při pohybu součástí v drážce, čímž klesá smykové tření. Odlehčení je frézováno čelní válcovou frézou se zaoblenými špičkami zubů. [2]

Při výrobě obdobné drážky, pouze na vnějším profilu, je postupováno stejným způsobem, s tím rozdílem že u vnějších rybinových drážek není zapotřebí se zabírat výrobou odlehčení.

#### **b) Rybinové drážky na hřídeli**

Při výrobě rybinových drážek na hřídeli, je nutné vzít v úvahu, zda je umístěna na čelní, nebo válcové ploše.

V případě že je rybinová drážka situována na čelní straně hřídele, lze pro její výrobu využít soustružnické stroje. I v tomto případě se začíná výrobou pravoúhlé drážky, která se následně rozjíždí do stran. Pro obě operace je zapotřebí mít k dispozici specializované nástroje. Problematickou částí při výrobě takovýchto rybinových drážek je kontrola, kdy nelze využít metod běžně používaných pro kontrolu přímých drážek. Takovéto speciální drážky se nejčastěji kontrolují buď pomocí speciálně k tomuto účelu zhotovených šablon, nebo pomocí souřadnicových měřících strojů. [5,6]



*Obr. č. 2.4 – Rybinová drážka na čele [5]*

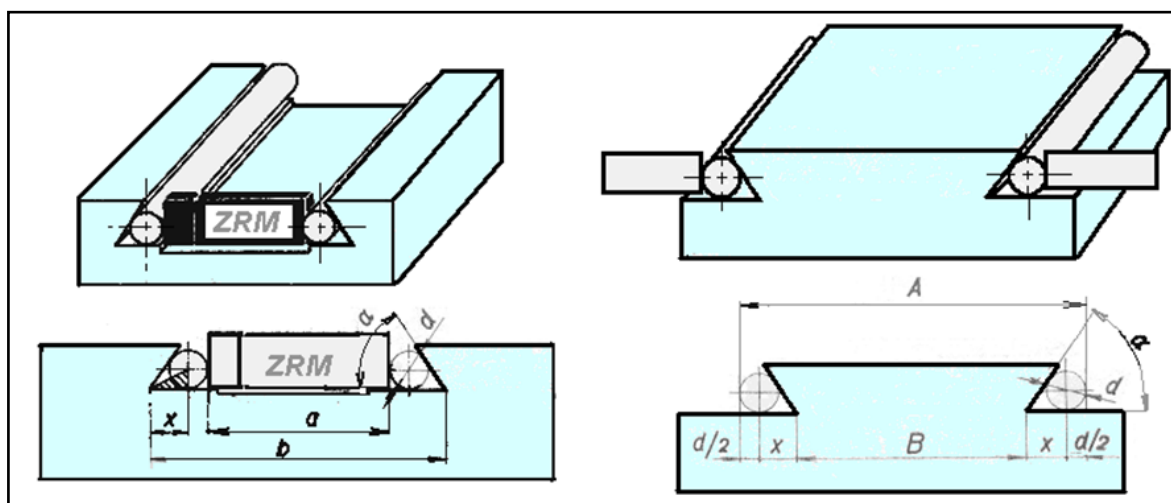
Obdobný postup bude i v případě že je rybinová drážka umístěna na válcové části hřídele. Nutností je opět použití specializovaných nástrojů, s upravenou geometrií břitu.

V případě že je k dispozici dostatečně sofistikované strojní zařízení, v podobě například víceosého obráběcího centra, lze oba případy rybinové drážky umístěné na hřídeli, vyrobit pomocí frézovacích operací. Výhodou tohoto řešení je pak fakt, že v takových případech už většinou není zapotřebí ani použití úzce zaměřených nástrojů, ale v závislosti na možnostech takového obráběcího centra lze drážky frézovat pomocí běžně dostupných fréz.

## 1.5 Měření a kontrola

Při kontrolním měření rybinových drážek hraje hlavní úlohu umístění drážky, kdy obecně uznávaný, standardizovaný postup měření se týká pouze přímých rybinových drážek.

Takovéto měření přímých rybinových drážek je prováděno nepřímou metodou tzv. přes válečky. Jelikož nelze změřit přímo šířku rybinové drážky, uvádí se jako kontrolovaný rozměr míra mezi válečky, u vnitřních rybinových drážek, a rozměr přes kontrolní válečky, u vnějších drážek. Schéma měření jak vnějších, tak vnitřních rybinových drážek lze vidět na následujícím obrázku.



Obr. č. 2.5 – Měření rybinových drážek [7]

U vnitřních rybinových drážek se pro kontrolu přes válečky využívá základních rozměrových měrek, které se postupně vkládají mezi kalibrované válečky, dokud mezi válečkem a rozměrovou měrou nezůstane žádná mezera. Výsledná hodnota rozměru mezi

válečky se pak určí jako součet hodnot základních rozměrových měrek. Pro měření vnějšího rozměru přes válečky se obvykle využívá třmenových mikrometrů různých rozsahů, v závislosti na celkovém rozměru rybinové drážky. [7]

Na výkresech se pro zjednodušení často kótují přímo pomocné rozměry přes válečky. V případech kdy je předepsána přímo šířka rybinové drážky, je nutno si pomocný rozměr dopočítat. Vzorec pro výpočet pomocných rozměrů lze odvodit z obrázku č. 2.5 a pro vnitřní rybinovou drážku se určí jako:

$$a = b - d - 2 \cdot x \quad [mm] \quad (2.1)$$

$$x = \frac{\frac{d}{2}}{\tan \frac{\alpha}{2}} \quad [mm] \quad (2.2)$$

Kde:

- $a$  ... rozměr přes válečky [mm]
- $b$  ... šířka rybinové drážky [mm]
- $d$  ... průměr kontrolních válečků [mm]
- $x$  ... vzdálenost od středu kontrolního válečku k okraji drážky [mm]
- $\alpha$  ... úhel sklonu boku rybinové drážky [°]

V případě, že je zapotřebí dopočítat rozměr přes válečku u vnější rybinové drážky, bude vzorec vypadat následovně:

$$A = B + d + 2 \cdot x \quad [mm] \quad (2.3)$$

Kde:

- $A$  ... rozměr přes válečky [mm]
- $B$  ... šířka rybinové drážky [mm]

Pro případy kdy jsou kontrolovány jiné typy rybinových drážek, je přístup do značné míry individuální. Buď je požadovaný přístup kontroly předepsán na výkrese, nebo jej určuje technolog. Obvykle se pak používají různé druhy šablon, speciální jednoúčelová měřidla nebo souřadnicové měřicí stroje.

## **2 Analýza současného stavu výroby rybinových drážek v podmínkách Vítkovice Heavy Machinery a.s.**

Ve společnosti VHM se jedná v naprosté většině případů o kusovou výrobu, kdy počty vyráběných kusů se pohybují v jednotkách, v ojedinělých případech pak desítkách kusů. Tomuto faktu také odpovídá výroba, jestliže je každá součást originál, obvykle také postup jejich výroby je do jisté míry specifický. Jinak tomu není ani v případě výroby rybinových drážek.

I přesto, že výrobní portfolio je poměrně široké, výskyt součástí, na kterých se zhotovují rybinové drážky, není tak častý. Obvykle se jedná o několik kusů v řádu měsíců. Způsob výroby takových drážek pak závisí především na jejich velikosti a umístění.

Menší rybinové drážky se vyrábějí převážně monolitními tvarovými frézami, které jsou v poměrně široké škále velikostí k dostání v nástrojovém skladu. Při použití takovýchto úhlových fréz se vždy jedná o drážky přímé. Maximální rozměr, který se vyráběl monolitní tvarovou frézou, je drážka hloubky 75 mm se sklonem 55° a šířky 200 mm. Nástroj použitý na tuto rybinovou drážku je zobrazen na následující fotografii, obr. č. 3.1.



*Obr. č. 3.1 – Úhlová fréza na výrobu rybinových drážek*

Nevýhodou tohoto způsobu výroby drážek je, že pro každou drážku je zapotřebí specifická fréza. A právě v případech, kdy se jedná o kusovou výrobu, a daná fréza se obvykle použije pouze jednou, je pořízení takovéto frézy finančně náročné.



Je-li zapotřebí vyrobít rybinovou drážku větších rozměrů, nebo rozměrů, kterým nevyhovuje žádná úlová fréza, která již je na skladě nástrojů, je snaha využít jiný způsob výroby, aby se ušetřilo za nákup drahých, ve své podstatě jednorázových fréz.

Jako příklad, co se týče výroby velkých rybinových drážek, lze uvést v současné době vyráběnou součást, která bude sloužit jako beran kovacího lisu. Součást v rozpracovaném stavu je zobrazena na následující fotografii č. 3.2.



*Obr. č. 3.2 – Beran kovacího lisu*

Rybinová drážka bude umístěna na spodní straně beranu. Na fotografii již lze vidět obrobenou pravoúhlou drážku, do které se po odstranění technologických přídavků, které sloužily pro chycení součásti do vřetene soustruhu, vyfrézují pod úhlem 60° boky rybinové drážky.

Rybinové drážky větších rozměrů, jaká je například na beranu kovacího lisu jsou ve společnosti VHM obvykle zhotovovány na horizontální fréze, za pomoci otočných frézovacích hlav. Tyto hlavy slouží ke změně směru osy rotace nástroje a mohou být buď jedno, nebo více stupňové. Dále jsou pak rozlišovány podle jejich převodového poměru, kdy většina otočných frézovacích hlav má na výstupu stejné otáčky jaké jsou na vřetenu obráběcího stroje a slouží tedy pouze ke změně směru. Běžné jsou ale také tzv. otočné zrychlovací hlavy, které mají na výstupu vyšší otáčky a jejich převodový poměr je tedy větší než 1:1.

Boky rybinové drážky například na beranu kovacího lisu budou zhotoveny na horizontální frézce za pomoci dvoustupňové otočné frézovací hlavy, jakou lze vidět na následující fotografii č. 3.3.



*Obr. č. 3.3 – Dvoustupňová otočná frézovací hlava*

Frézovací hlava je spojena nasazena na vřeteno obráběcího stroje a má převodový poměr 1:1. Slouží tedy pouze ke změně směru osy rotace a to ve dvou rovinách.

Jako nástroj pro obrobení boků rybinové drážky se v takových případech používají tzv. kopírovací frézy, v tomto případě frézovací hlavy osazené kulatými vyměnitelnými břitovými destičkami (dále jen VBD).



*Obr. č. 3.4 – Kopírovací fréza Ingersoll 5W7K052 R00*

Velikost zvolené kopírovací frézy pak závisí na typu a velikosti obráběné rybinové drážky.

Boky rybinových drážek jsou obráběny za pomoci kopírovací frézy tzv. řádkováním. Řádkování je způsob frézování, při kterém se obrábějí plochy při konstantní hloubce řezu. Kvalita šikmých ploch, jakými jsou například boky rybinové drážky, pak závisí právě na zvolené hloubce řezu a poloměru VBD frézovací hlavy. Přičemž při snižování hloubky řezu, nebo zvětšování poloměru VBD se kvalita obrobených ploch bude zvyšovat.

### 3 Návrh a realizace výroby rybinové drážky na hřídeli v hlavici vřetena

Jak již bylo zmíněno, nejdůležitějším parametrem pro volbu technologie výroby rybinové drážky je umístění drážky na součásti. A právě v tomto případě se jedná o takové umístění, které neumožňuje využití klasických, dříve popsaných způsobů výroby, ani konvenčních nástrojů určených k výrobě rybinových drážek.

#### 3.1 Popis součástí a umístění rybinové drážky

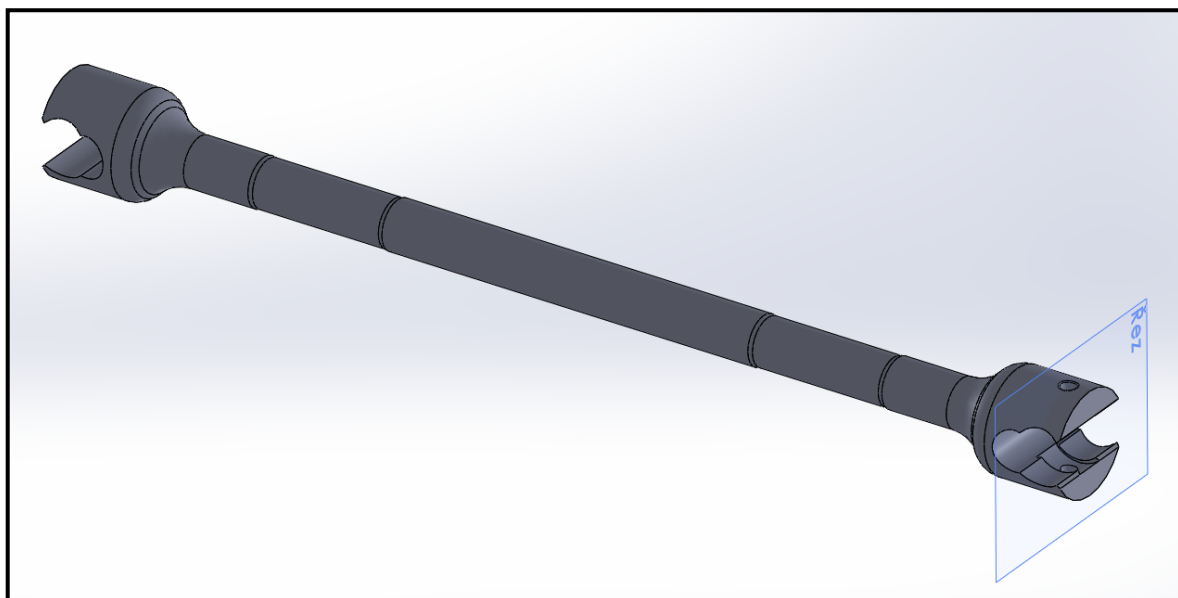
Rybinová drážka je situována na hřídeli, která bude sloužit pro přenos kroutícího momentu. Součást bude složit jako kardanová hřídel pro válcovací trať ve válcovnách společnosti Primetals Technologies a.s.

Z hlediska rozměrů se jedná o poměrně velkou součást, kdy se svou délkou přes 11 metrů a hmotností 24 tun jde o jednu z větších hřídelí, vyráběnou ve společnosti Vítkovice heavy machinery z jednoho kusu. Polotovár pro hřídel je zhotoven technologií odlévání a následně opracován různými metodami obrábění do požadovaných rozměrů. Základní charakteristiky hřídele jsou zobrazeny v tabulce č. 1.

Tabulka 1 – Základní charakteristiky hřídele

Materiál	36NiCrMo16
Hmotnost [kg]	24 000
Délka [mm]	11 400
Max. průměr [mm]	1 100
Min. průměr [mm]	508

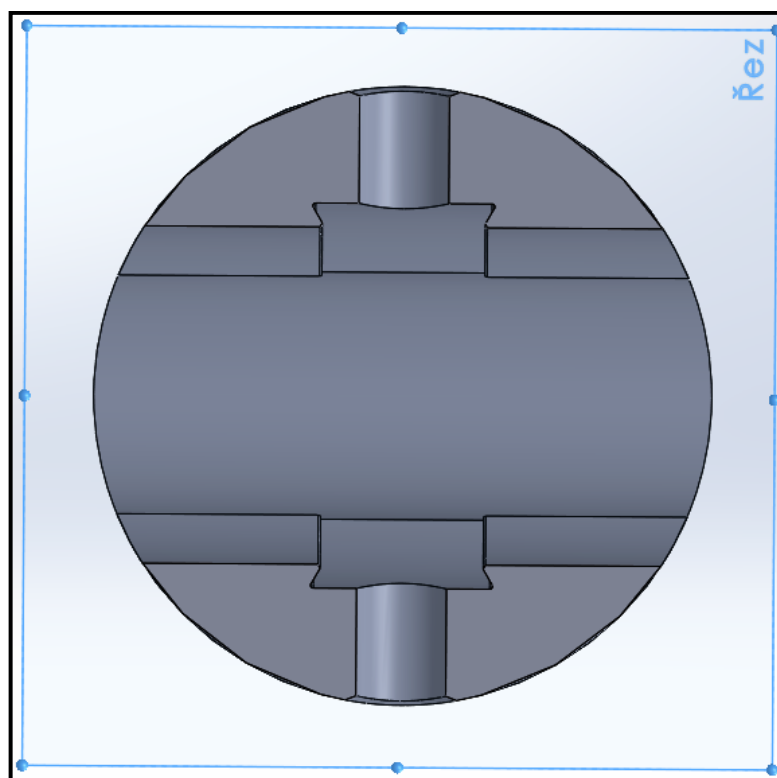
Díky svým rozměrům se celkově jedná o poměrně těžce obrobitelnou součást, především z hlediska manipulace a ustavení při jednotlivých operacích. Orientační náhled součástí je zobrazen na obrázku č. 4.1.



*Obr. č. 4.1 – Orientační náhled součásti*

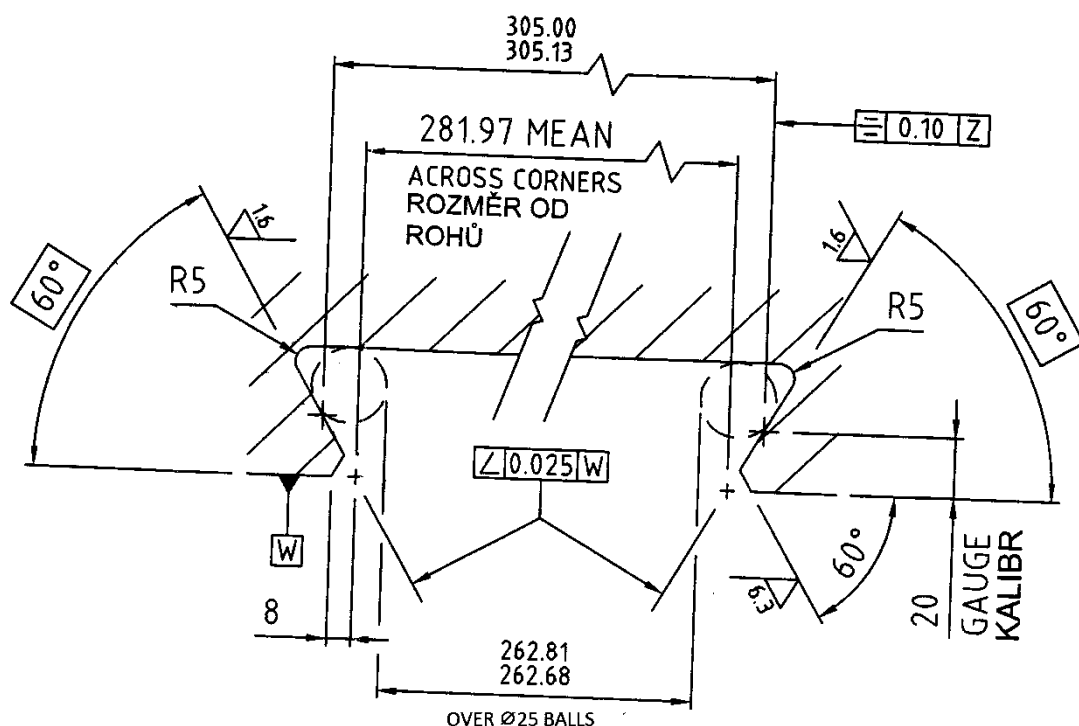
Jak lze vidět na obrázku, rybinová drážka je umístěna v pravé hlavici vřetena. Unikátní je tato rybinová drážka především z toho důvodu, že je situována uvnitř hlavice vřetena a navíc vedena po kružnici.

Dále je z obrázku patrné, že součást, kolmo na osu hřídele protíná fiktivní rovina „Řez“. Jestliže danou rovinou povede řez, zobrazí se detail umístění rybinové drážky. Náhled součástí v řezu je vidět na následujícím obrázku.



*Obr. č. 4.2 – Orientační náhled součásti v řezu*

Dalším důležitým parametrem pro návrh technologie výroby je požadovaná přesnost. V tomto případě je přesnost zadána na výkresu, stejně jako způsob kontroly důležitých parametrů.



Obr. č. 4.3 – Detail rybinové drážky z výkresu [10]

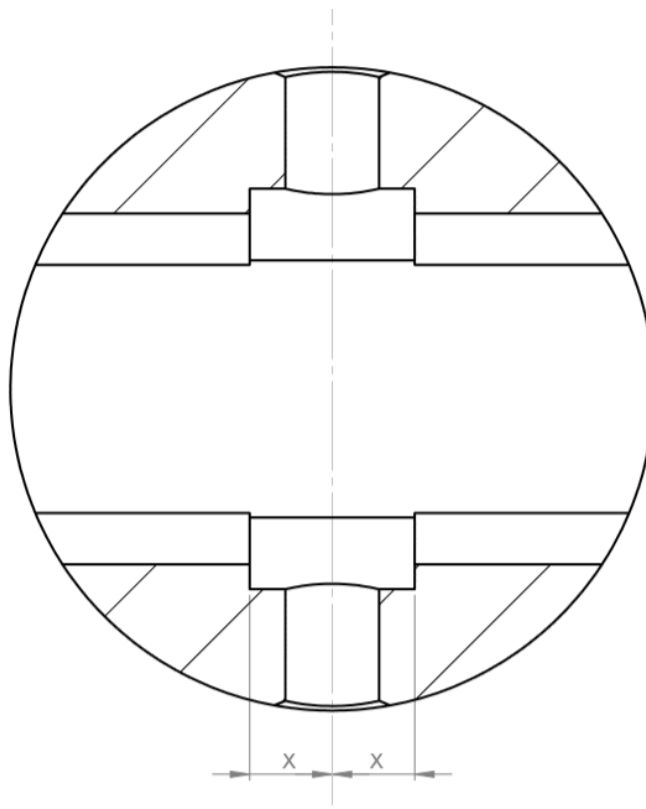
Detail rybinové drážky včetně rozměrů a požadavků na kontrolu je zobrazen na obrázku, a jasně z něj plyne, že požadavky na přesnost výroby jsou vzhledem k velikosti drážky poměrně vysoké. Kritický je pak především předepsaný rozměr tloušťky drážky s celkovou tolerancí 0,13 mm, a dále geometrická tolerance sklonu boků rybinové drážky.

### 3.2 Návrh výroby rybinové drážky

Při návrhu je nutné zohlednit veškeré požadavky zadavatele a to jak na přesnost výroby, tak na jakost zpracování a zároveň navrhnout takový způsob výroby který bude finančně rentabilní. Teoreticky je možno drážku na zadané hřídeli vyrobit více různými způsoby, nicméně je nutné zohlednit také možnosti strojního parku, kterým společnost disponuje. Pro názornost jsou popsány dva různé způsoby, jakými je možno rybinovou drážku zhotovit. Následně jsou shrnuty jednotlivé výhody a nevýhody a vybrána vhodnější varianta.

### 3.2.1 Hrubování drážky

V první řadě je zapotřebí v předvrtané díře vyhloubit pravoúhlou drážku, která je základem každé rybinové drážky a která se následně bude rozjíždět do stran s požadovaným úhlem sklonu. Toto vybrání je nejjednodušší a nejefektivnější provést za pomoci kotoučové frézy. Jedná se poměrně o snadnou operaci, která nevyžaduje zvláštní pozornost. Důležité však je, aby vyfrézovaná drážka byla středově souměrná, jak je zobrazeno na následujícím obrázku č. 4.4.



Obr. č. 4.4 – Pravoúhlá drážka

Způsob vyhotovení pravoúhlé drážky bude v obou případech stejný. Různé pak budou pouze způsoby, jakými lze vyrobit boky rybinové drážky v požadovaném úhlu. Vzhledem k možnostem strojního vybavení ve společnosti Vítkovice Heavy Machinery bude celý proces výroby rybinové drážky, tedy jak pravoúhlá drážka, tak následné úhlové vybrání realizováno na horizontální frézce WD 200.

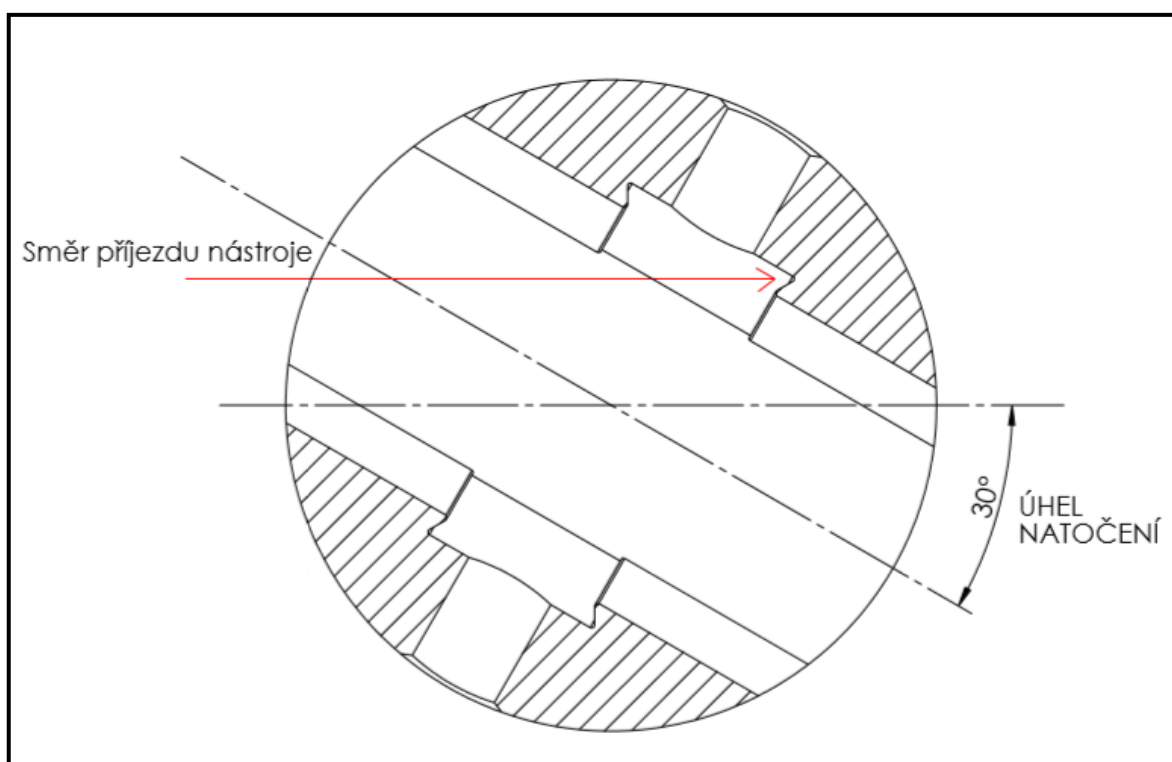


### 3.2.2 Dokončování rybinové drážky varianta 1

Jedním ze způsobů, jak by se daly vyrobit již zmíněné boky takto umístěné rybinové drážky, je pomocí stopkové tvarové, popřípadě kopírovací frézy.

V tomto případě bude nejtěžší správně napolohovat celý obrobek do takové pozice, aby měla zvolená fréza dobrý přístup k místu řezu a zároveň byly zabezpečeny konečné přesnosti, jak sklonu boků, tak šířky rybinové drážky.

Nejprve je zapotřebí natočit obrobek o  $30^\circ$  kolem osy rotace hřídele, aby byl zabezpečen přístup k místu řezu. Zároveň však musí být osa rotace hřídele kolmo na osu nástroje. Schéma pootočení obrobku je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obr. č. 4.5 – Schéma natočení obrobku

Jak je vidět, při zvoleném natočení obrobku má nástroj dostatek prostoru aby se dostal k místu řezu a vyfrézoval tak drážku požadovaných rozměrů. Nutností při tomto postupu je mít souřadnicově řízený stroj, neboť se nástroj při obrábění bude pohybovat kontinuálně ve třech osách.

Nevýhodou tohoto postupu je, že by se každá drážka musela frézovat samostatně. To znamená, že po obrobení jedné strany rybinové drážky bude zapotřebí opětovně pootočit celý obrobek kolem jeho osy rotace do požadovaného úhlu, v závislosti na tom, který bok



rybinové drážky budeme obrábět. Celé obrobení rybinové drážky uvnitř hlavice vřetena by v tomto případě bylo realizováno na pět upnutí polotovaru.

Již jedno samostatné ustavení obrobku je vzhledem k jeho rozměrům velmi náročná záležitost. Zajistit ve všech případech tak shodné ustavení, aby bylo v konečné podobě dosaženo požadovaných přesností, by vyžadovalo speciální přípravky. Vzhledem k tomu, že zakázka obsahuje pouze jeden kus této součásti, byla by tvorba speciálních přípravků finančně neadekvátní.

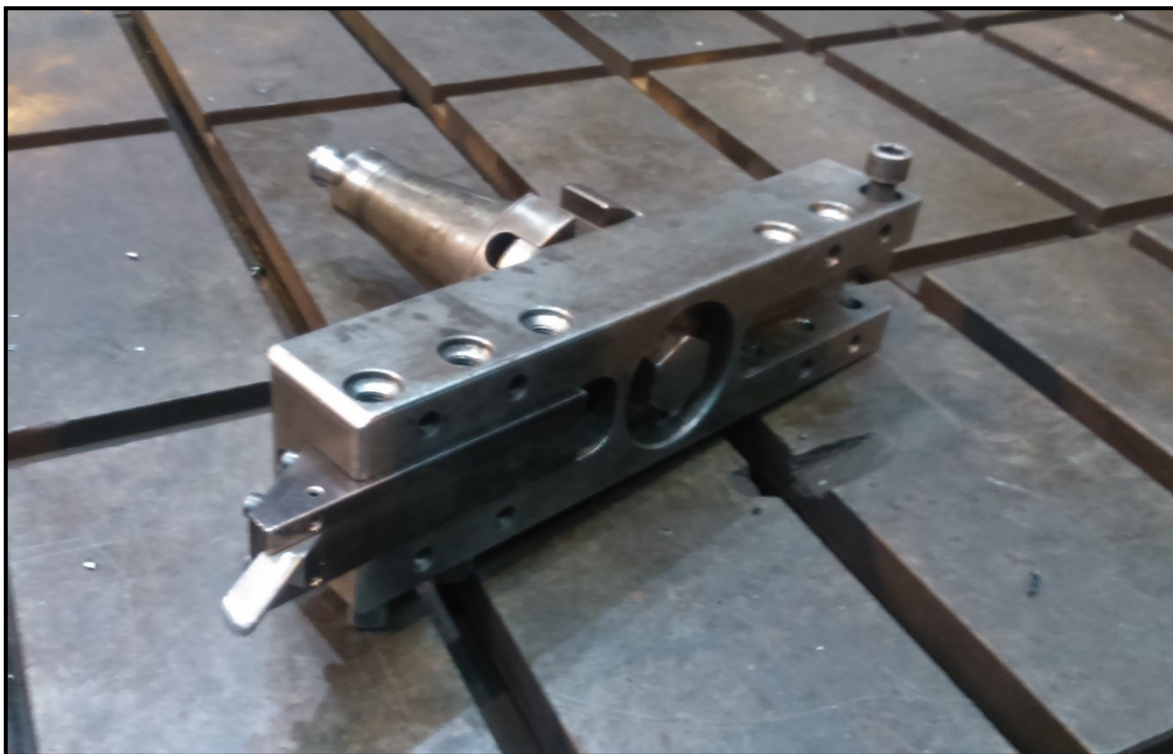
Po diskuzi s technologi ve společnosti Vítkovice Heavy Machinery bylo tedy rozhodnuto, že je zapotřebí najít jiný způsob jakým bude rybinová drážka vyrobena. Takový způsob, aby výroba celé drážky, nejlépe včetně vyvrtání díry v hlavici vřetena byla realizována na co nejmenší počet ustavení a upnutí součásti.

### **3.2.3 Dokončování rybinové drážky varianta 2**

Jak již bylo řečeno, nejprve je zapotřebí v předvrtané díře zhotovit pravoúhlou drážku, která bude dále rozjížděna a vytvoří se tak boky rybinové drážky. Pro tvorbu pravoúhlých drážek ať už přímých, nebo jako v tomto případě, kdy je drážka vedena po kružnici, mají ve společnosti VHM ověřené způsoby a zažitě postupy. Tak bylo po konzultaci s technologi rozhodnuto, že výroba bude realizována za pomoci kotoučové frézy, na horizontální frézce.

Dále byl s ohledem na problematiku opětovného ustavování a upínání obrobku navržen způsob, jakým lze celou rybinovou drážku obrobit na jediné upnutí. Tento způsob zahrnuje použití frézovací hlavy opatřené drážkou, do které se následně upne nástroj, v podobě speciálního nože, který má profil požadovaného vybrání rybinové drážky.

Tento přípravek se ve strojírenské výrobě používá poměrně ojediněle, a to především v případech, kdy je zapotřebí velkého radiálního vysunutí bříty. Přípravek tohoto typu, který mají k dispozici pro výrobu ve VHM je zobrazen na následujícím obrázku č. 4.6.

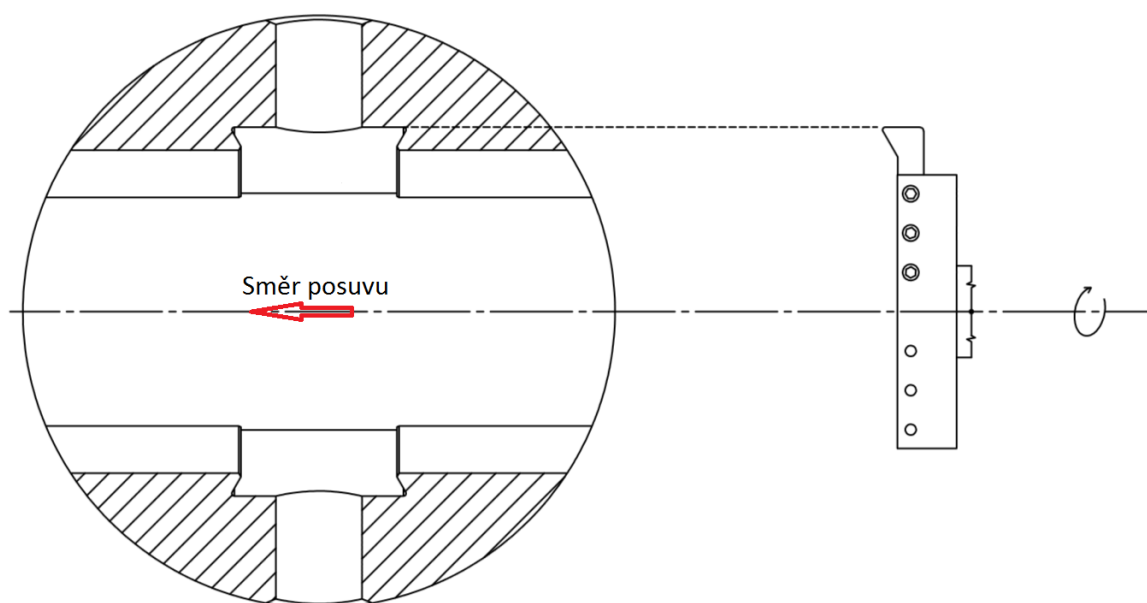


*Obr. č. 4.6 – Přípravek pro upnutí nástroje*

Jak je vidět, sestava přípravku se skládá z upínacího trnu ISO 60, který je zapotřebí pro spojení nástroje s vřetenem obráběcího stroje. Následně je na upínací trn, pomocí šroubu připevněn přípravek, který dále obsahuje dvě drážky určené k upínání nožů. Jedná se o univerzální přípravek, do kterého je možno upnout jak jednotlivé monolitní nože, tak další přípravky sloužící k upnutí menších nástrojů. Právě takovouto sestavu, kde je do přípravku opět upnut menší nástrojový držák lze vidět na obrázku.

Obrobek se v tomto případě ustaví do takové pozice, jaká je zapotřebí pro vytvoření pravoúhlé drážky za pomoci kotoučové frézy na horizontální frézce. Tedy do polohy, kdy bude osa rotace nástroje rovnoběžná s osou předvrtané díry, ve které je celá drážka umístěna.

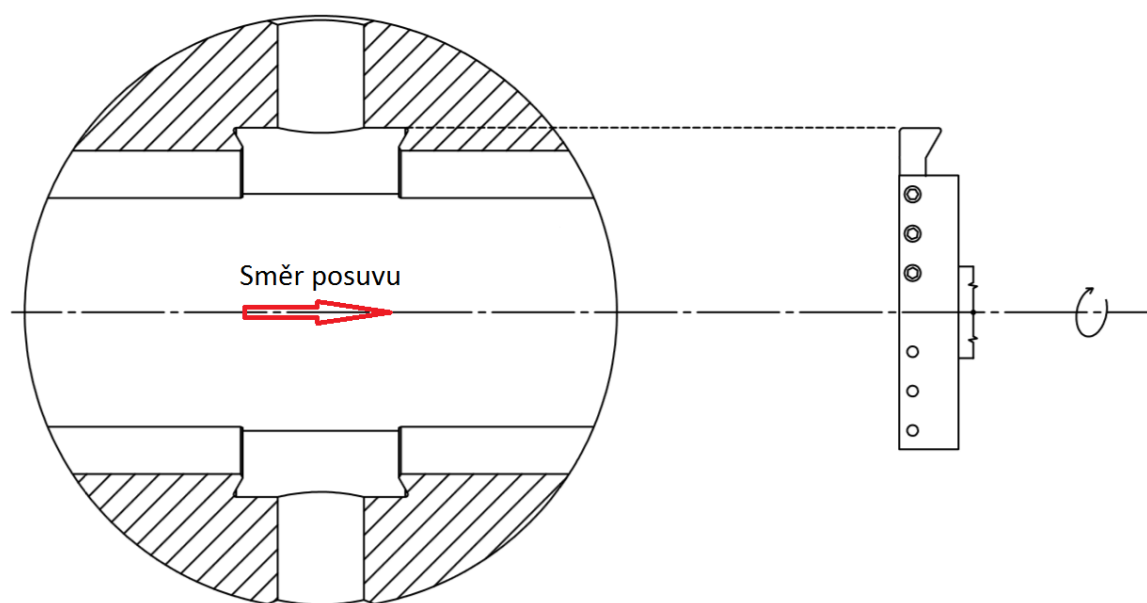
Po vyfrézování pravoúhlé drážky se do již zmíněného držáku upne speciální nůž, který musí mít tvar požadovaného vybrání rybinové drážky. Velmi důležité je v tomto případě samotné upnutí nástroje do držáku, protože je zapotřebí přesně zajistit takové vyložení nástroje, aby při frézování byla vyrobena současně jak spodní, tak vrchní část rybinové drážky.



Obr. č. 4.7 – Schéma vyložení nástroje v držáku

S nástrojem se najede do již zhotovené pravoúhlé drážky a při rotaci nástroje v ose předvrtané díry a posuvem, jehož směr je naznačen na obrázku, pak bude nástroj za přerušovaného řezu frézovat na kružnici umístěné boky rybinové drážky.

Jakmile bude obrobena jedna strana rybinové drážky, není nutné nijak manipulovat s obrobkem, ale pouze se vymění nůž v nástrojovém držáku. Pro obrobání druhého boku rybinové drážky bude použit obdobný nůž, který bude zrcadlovým obrazem prvního nože. Nůž se opět upne do držáku stejným způsobem.



Obr. č. 4.8 – Schéma ustavení druhého nástroje

Samotné obrábění pak bude probíhat stejným způsobem, s tím rozdílem, že se změní směr posuvu, jak je to znázorněno na obrázku č. 4.8.

Tento navrhovaný způsob výroby se v porovnání s prvním variantou jeví jako lepší řešení, především z toho hlediska, že celou drážku je možno obrobit na jediné ustavení polotovaru. To s ohledem na požadovanou přesnost zajistí lepší výchozí podmínky. Výsledná jakost a přesnost rybinové drážky pak bude záviset především na přesnosti tvarových nástrojů.

### 3.3 Rámcový technologický postup výroby hřídele

Samotné výrobě rybinové drážky předchází řada technologických operací, jejichž provedení a přesnost může přímo ovlivnit následnou přesnost rybinové drážky.

Tabulka 2 – Technologický postup výroby hřídele

Číslo operace	Technologická operace	Poznámka
1	Kování	Polotovar s přídavkem na obrábění a s technologickými přídávky k prvnímu upnutí na soustruhu.
2	Soustružení	Upnutí za technologické přídávky a hrubování tvaru.
3	Frézování	Odstranění technologických přídavek na horizontální frézce
4	Vrtání	Kopinatý vrták: menší díra do hlavice vřetena.
5	Frézování	Větší díry do obou hlavíc vřetena, frézovací hlavou s VBD, při použití kruhové interpolace.
6	Tepelné zpracování	Kalení, popouštění.
7	Soustružení	Dokončování vnějšího tvaru.
8	Frézování	Délka hotově, drážky v hlavicích vřetena
9	Soustružení	Zkosení čela.
10	Měření a kontrola	Rozměrová přejímka.
11	Balení	
12	Expedice	

### 3.4 Realizace výroby rybinové drážky dle varianty 2

Pro výrobu rybinové drážky byla vybrána druhá navrhovaná varianta, tedy způsob, při kterém lze rybinovou drážku obrobit na jediné upnutí. Rámcový technologický postup výroby rybinové drážky je popsán v následující tabulce.

Tabulka 3 – Technologický postup výroby rybinové drážky

Číslo operace	Technologická operace	Nástroj	Poznámka
1	Frézování	Kotoučová fréza Ø400x20	Obrábění pravoúhlé drážky.
2	Měření a kontrola	Mikrometrický odpich	Kontrola šířky a hloubky pravoúhlé drážky.
3		Drsnoměr Diavite	Kontrola drsnosti na dně rybinové drážky.
4	Frézování	Speciální řezný nástroj s pájenou břitovou destičkou	Hrubování jedné strany úhlového vybrání rybinové drážky.
5			Výměna nástroje a hrubování druhé strany úhlového vybrání rybinové drážky.
6		Speciální řezný nástroj z radeco oceli	Dokončování jedné strany úhlového vybrání rybinové drážky.
7			Výměna nástroje a dokončování druhé strany úhlového vybrání rybinové drážky.
8	Měření a kontrola	Optický úhloměr	Kontrola úhlu.
9		Šablona rybinové drážky	Porovnání tvaru rybinové drážky se speciální šablonou.
10		Mikrometrický odpich	Kontrola šířky drážky.

### 3.4.1 Ustavení hřídele

Správné ustavení polotovaru vzhledem k obráběcímu stroji, hraje při obrábění rybinové drážky zásadní roli. Při ustavení bylo nutné zajistit, aby osa obráběné hřídele byla kolmá na osu rotace nástroje upnutého na horizontální frézce.

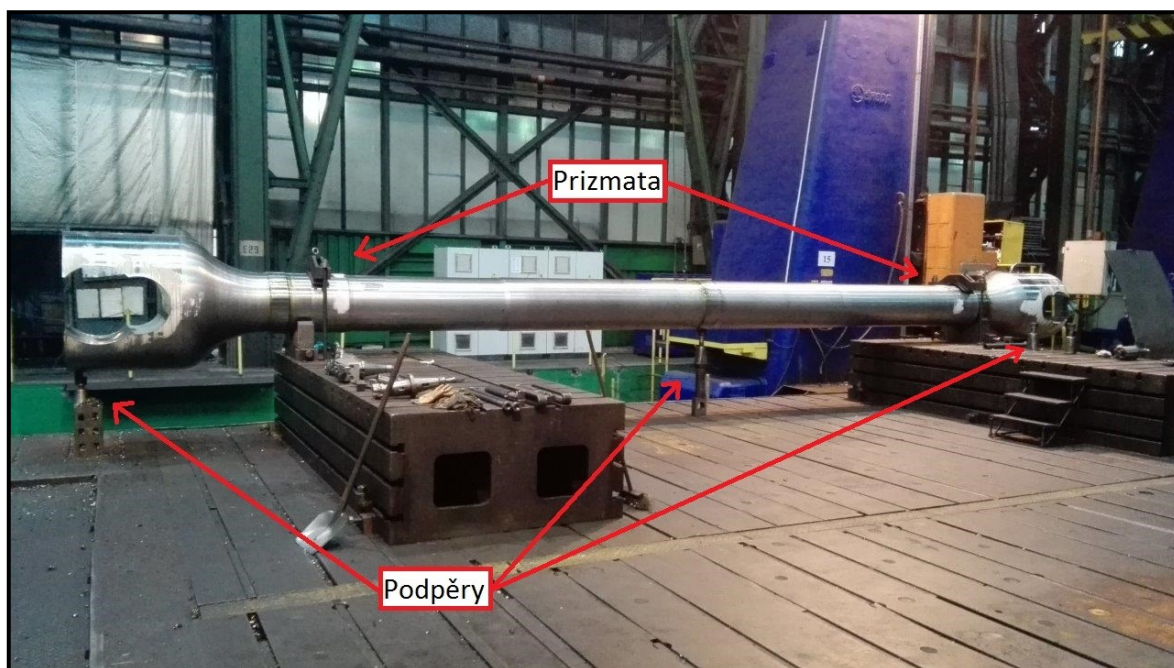
Statickou polohu rotačních hřídelí lze poměrně snadno zajistit pomocí prizmatických upínek. V tomto případě, byla použita dvě prizmata, do kterých se položila hřídel a následně se poloha zajistila z horní části přitlačnými deskami, které byly pomocí šroubu dotaženy ke stolu.



*Obr. č. 4.9 – Prizmatické upnutí hřídele*

Prizmata byla situována na obou koncích hřídele, jak je vidět na následující fotografii. Vzhledem k velikosti hřídele, byla dále hřídel podepřena třemi podpěrami, aby nemohlo dojít k průhybu, respektive ohybu, způsobených vlastní vahou hřídele.

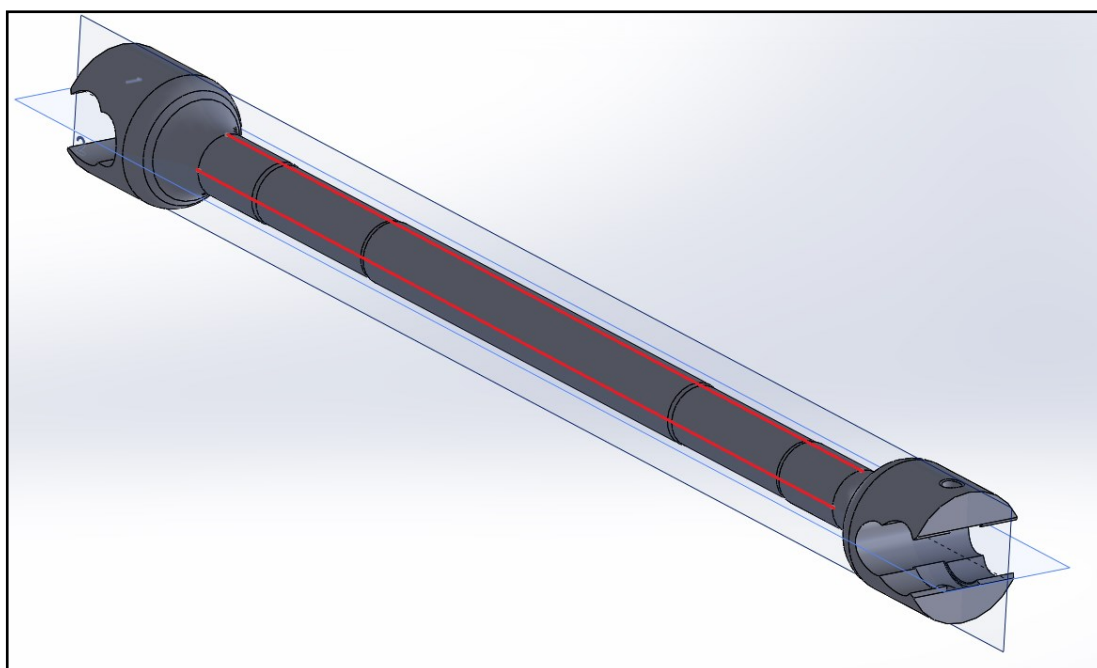




*Obr. č. 4.10 – Ustavení hřídele*

Rovnoběžnost osy hřídele s podélným pojezdem obráběcího stroje, se zajistila pomocí měření odchylky na číselníkovém úchylkoměru a následnou korekcí ustavení a opětovným měřením.

Číselníkový úchylkoměr, jakožto standartní měřidlo pro velikost odchylky od požadované polohy, se upnul do přípravku, který byl spojen s vřetenem obráběcího stroje. Odchylka se poté kontrolovala ve dvou na sebe kolmých rovinách. Měřicí roviny se znázorněnou dráhou měření jsou vidět na následujícím obrázku.



*Obr. č. 4.11 – Roviny měření*

První měření bylo provedeno z horní strany hřídele a kontrolovala se tak vodorovnost ustavení součásti. Měření obecně probíhá takovým způsobem, že je funkční plocha číselníkového úchylkoměru přitlačena na měřenou plochu a při pomalém podélném posuvu stroje, lze odečítat odchylku od požadované polohy.

Druhé měření pak probíhalo stejným způsobem, s tím rozdílem, že nebyla měřena vodorovná poloha hřídele, ale její rovnoběžnost s podélným posuvem frézky. Měřenou plochou byla tedy boční strana hřídele.

Po každém měření následovala vždy korekce ustavení a opětovné přeměření polohy součásti. Celkový čas potřebný ke správnému stavení hřídele k obráběcímu stroji byl nakonec zhruba 4 hodiny.

### **3.4.2 Hrubování drážky**

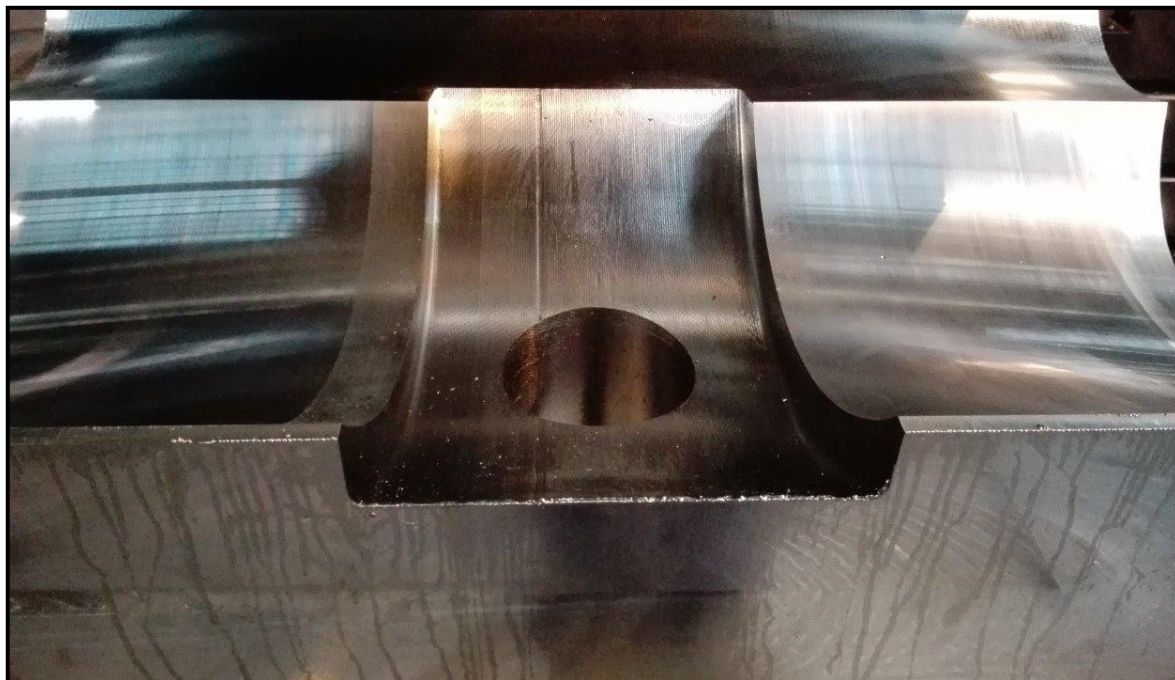
Nejprve je zapotřebí vyfrézovat pravoúhlou drážku, to je provedeno, jak bylo popsáno v obou návrzích, tedy za pomoci kotoučové frézy. Pro výrobu drážky byla použita kotoučová fréza Ø 400 mm a šířky 25 mm, osazena vyměnitelnými břitovými destičkami.



*Obr. č. 4.12 – Frézování pravoúhlé drážky*



Při frézování bylo nutné zajistit jednak přesnou polohu drážky, především aby drážka ležela ve středu hlavice vřetena, a dále její rozměry. Kontrolovala se jednak šířka drážky, ale hlavně pak hloubka vybrání. Již zhotovenou pravoúhlou drážku lze vidět na následujícím obrázku č. 4.13.



Obr. č. 4.13 – Pravoúhlá drážka

Na výkrese byla dále předepsána drsnost obrobeneho povrchu na dně rybinové drážky. Požadavek byl  $R_a$  1,6. To bylo splněno, za pomoci správně zvolených parametrů obrábění. Při nízkých otáčkách a posuvech bylo dosaženo zhruba požadované drsnosti, jak je vidět na obrázku.

Tabulka č. 4 – Řezné podmínky hrubování kotoučovou frézou Ø400x25

Průměr frézy	$D_n$	400	[mm]
Počet zubů	$z$	26	[-]
Řezná rychlost	$v_c$	88	[m · min <sup>-1</sup> ]
Otáčky	$n$	70	[min <sup>-1</sup> ]
Posuv	$v_f$	50	[mm · min <sup>-1</sup> ]
Hloubka třísky	$a_p$	1,5	[mm]
Posuv na zub	$f_z$	0,03	[mm]
Šířka frézování	$a_e$	24	[mm]

### 3.4.3 Frézování úhlového vybrání

Z vybraného návrhu vyplývá, že pro zhotovení bočních stěn vyráběné drážky bude zapotřebí speciálního obráběcího nože. Pro tyto účely mají ve společnosti VHM vlastní nástrojárnu, která jednak renovuje používané nástroje a dále podle potřeby výroby zhotovuje nástroje nové.

Pro obrobení boků drážky bylo zapotřebí vyrobit dva nože, které mají parametry shodné s požadovaným profilem a jsou navzájem svým zrcadlovým obrazem. Oba vyrobené nože jsou vidět na následující fotografii č. 4.14.



*Obr. č. 4.14 – Obráběcí nože*

Oba nože mají tělo zhotovené z nástrojové oceli. Řezná část je dále vyrobena ve formě destiček z rychlořezné oceli a přiletovaná na tělo nástroje. Při volbě materiálu bylo důležité vzít v úvahu hlavně jeho trvanlivost při obrábění, aby byla zajištěna určitá přesnost obrobených ploch, než dojde k otupení řezné části.

Nože byly vyrobeny za pomoci drátové řezačky, což zaručuje poměrně vysokou přesnost. Profily nožů byly poté dokončeny na brusce nástrojů a kontrolovány pomocí šablon, které byly k tomuto účelu zhotoveny taktéž na drátové řezačce, s vysokým stupněm

přesnosti. Nakonec se do čelní plochy nástroje vybrousil lamač třísek, pro zlepšení odvodu třísek z místa řezu.

Aby byla zajištěna požadovaná přesnost, byly tyto nože použity pouze pro hrubování úhlového vybrání. Vzhledem k tomu, že je nástroj vystaven přerušovanému řezu a tím pádem velkému rázovému namáhání, dochází relativně k velkému otupování, což s sebou postupně přináší sníženou přesnost obrobených ploch. Velmi důležité je pro obrábění zvolit takové řezné podmínky, aby nože vydržely pracovat s přípustnou přesností až do konečného vyhrubování, jelikož nože nelze naostřit.

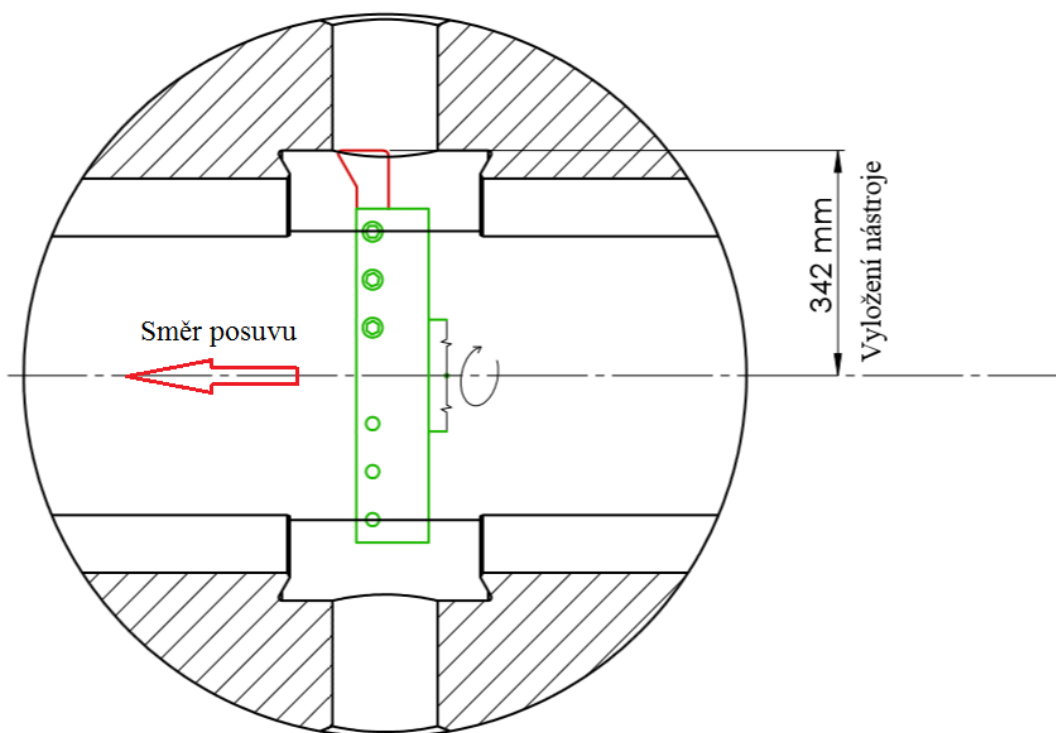
Tabulka č. 5 – Řezné podmínky hrubování profilu rybinové drážky speciálním řezným nástrojem

Průměr frézy	$D_n$	684	[mm]
Počet zubů	$z$	1	[-]
Řezná rychlost	$v_c$	11	[m · min <sup>-1</sup> ]
Otáčky	$n$	5	[min <sup>-1</sup> ]
Posuv	$v_f$	0,2	[mm · min <sup>-1</sup> ]
Hloubka třísky	$a_p$	0,04	[mm]
Posuv na zub	$f_z$	0,04	[mm]

Při přebroušení by docházelo ke změně profilu nože a ten by poté nekorespondoval s požadovaným profilem rybinové drážky. Z tohoto důvodu také nože nelze použít pro konečné dokončení rybinové drážky.

Hrubování profilu rybinové drážky bylo realizováno podle postupu popsaného v návrhu na dokončení variantu 2. Kdy se po obrobení pravoúhlé drážky pouze vyměnil nástroj. K vřetenu obráběcího stroje se připojila frézovací hlava, do které byl upnut profilový nůž. Důležitá součást procesu je v tomto případě příprava k samotnému obrábění, především pak upnutí profilového nože do frézovací hlavy. Je nezbytné zajistit takové vyložení nože, které umožní, při njetí do výchozí polohy obrábět jak spodní tak vrchní část rybinové drážky současně.

Výchozí poloha je v tomto případě taková, že se s nástrojem najede do vyvrtané díry v hlavici vřetena a osa rotace nástroje se ztotožní z osou vyvrtané díry.



Obr. č. 4.15 – Výchozí poloha, vyložení nástroje

Při ustavení nože bylo tedy nutné zajistit, aby byl nůž vyložen o 342 mm vzhledem k ose rotace. Vyložení nože bylo realizováno pomocí posuvného měřítka, kdy se kontrolovala vzdálenost špičky nože od konce frézovací hlavy. Nůž upnutý ve frézovací hlavě pak přesahoval o 117 mm. I přesto, že se jedná o poměrně velké vyložení, nevznikaly při frézování vibrace, které by ovlivňovaly přesnost, popř. jakost výroby. To bylo dáno celkovou velikostí a tuhostí nože a celé sestavy frézovací hlavy.

Hrubování bylo provedeno s přídávkem na dokončení o velikosti 0,5 mm. Po vyhrubování jedné strany rybinové drážky je zapotřebí s nástrojem vyjet z hlavice vřetena a vyměnit nůž ve frézovací hlavě. Ustavení pak probíhá stejným způsobem, se stejným vyložení nože. Po opětovném upnutí frézovací hlavy k vřetení stroje je pak řezná část nože otočená opačným směrem. Samotný obráběcí proces dále probíhá také stejným způsobem, s tím rozdílem, že se změní směr posuvu.

### 3.4.4 Dokončování drážky

Pro dokončení úhlového vybrání byly dále vyrobeny další dva menší nože. Tyto nože jsou vyrobeny z radeco oceli. Radeco je označení pro HSS (High Speed Steel) ocel DIN S 12-1-4 která je určena pro výrobu obráběcích nástrojů. Tato ocel se dodává jako polotovar ve formě čtvercových, kulatých nebo obdélníkových tyčí. Je již zakalená a zpracovává se pouze broušením, kdy se vybrousí požadovaný profil a pracovní úhly.

Polotovar pro dokončovací nože byl čtvercového profilu 14x14 mm. Do radeco hranolu se vybrousil profil který má rádius špičky stejný jako zakončený profil rybinové drážky, tedy R5. Dále je nůž opět opatřen lamačem třísek. Jeden ze zhotovených nožů je vidět na následující fotografii č 4.16.



*Obr. č. 4.16 – Radeco dokončovací nůž*

Také v případě dokončování úhlového vybrání se nůž upne do frézovací hlavy. Než se však ustaví do požadované polohy ve frézovací hlavě, je upnut do menšího nožového držáku.

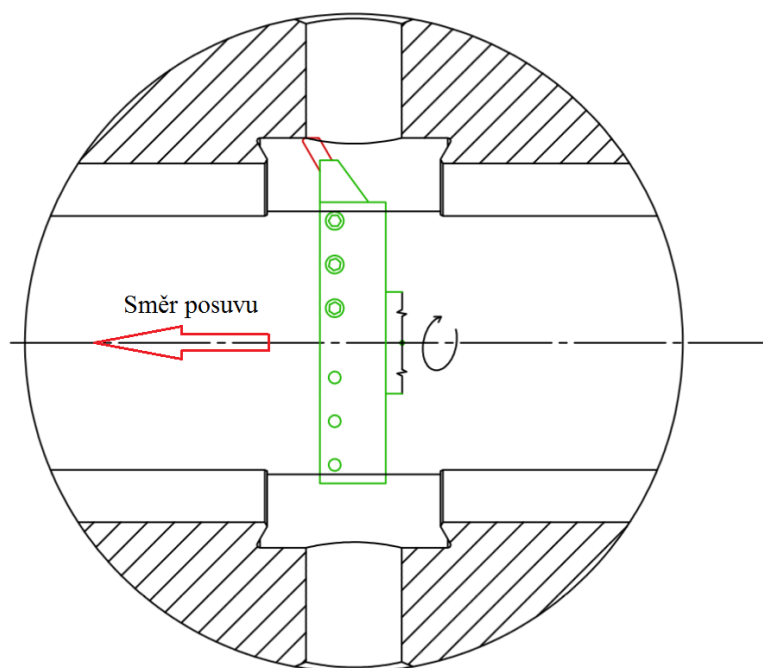
Důležitým prvkem je opět především samotné ustavování nože v nástrojovém držáku. Jednak celkové vyložení nástroje, které musí být stejné jako ve všech předchozích případech, ale dále také sklon radeco nože v držáku. Ten musí být přesně 60 ° vzhledem k ose rotace nástroje. Tento parametr je o to důležitější, neboť na něm bude záviset výsledný sklon vybrání rybinové drážky. Úhel sklonu drážky je předepsán na výkrese



právě hodnotou  $60^\circ$  a vztahuje se k němu geometrická tolerance sklonu která má hodnotu 0,025.

Vzhledem k vysokému požadavku na přesnost sklonu drážky byl k tomuto účelu na drátové řezačce vyroben speciální nástrojový držák, který zajistí přesnou polohu a především pak úhel radeco nože. Ustavení radeco nože v nástrojovém držáku a dále i ve frézovací hlavě lze vidět na obrázku č. 4.6.

Před obráběním se opětovně najede frézovací hlavou do vyvrtané díry hlavice vřetena, tak aby se osa rotace nástroje ztotožnila s osou díry. Pracovní pohyb nástroje pak bude veden stejným způsobem jako při hrubování. Po dokončení jedné strany drážky se obdobně jako při hrubování pouze vyjede z hlavice vřetena a v nástrojovém držáku se vymění nůž. Oba nože mají stejný profil a jsou navzájem svým zrcadlovým obrazem.



Obr. č. 4.17 – Schéma dokončování rybinové drážky

I přesto, že teoreticky by se dalo celou drážku vyhrubovat i dokončit jedním nástrojem, neboť hrubovací nože mají profil shodný s tvarem drážky, je použití dokončovacích nástrojů nezbytné, aby byla dosažena požadovaná přesnost.

Tabulka č. 6 – Řezné podmínky dokončování profilu rybinové drážky speciálním řezným nástrojem z radeco oceli

Průměr frézy	$D_n$	684	[mm]
Počet zubů	$z$	1	[-]
Řezná rychlost	$v_c$	11	[m · min <sup>-1</sup> ]
Otáčky	$n$	5	[min <sup>-1</sup> ]
Posuv	$v_f$	0,2	[mm · min <sup>-1</sup> ]
Hloubka třísky	$a_p$	0,5	[mm]
Posuv na zub	$f_z$	0,04	[mm]

Při zvolených řezných podmínkách došlo k přijatelnému opotřebení nástrojů, s čímž souvisí dosažení optimální jakosti obráběných ploch. Nicméně celá operace byla vlivem nízkých posuvů poměrně zdlouhavá a celkový čas obrobení pouze úhlového vybrání byl pak delší než 30 hodin.

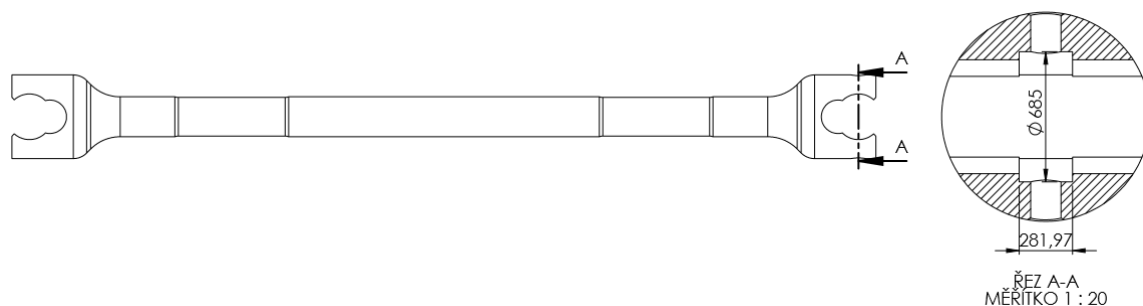
## 4 Návrh a realizace měření rybinové drážky na hřídeli v hlavici vřetena

Při výrobě většiny strojních součástí hraje přesnost klíčovou roli. Pro výrobu této rybinové drážky jsou pak požadavky na přesnost obzvlášť vysoké. Jestliže se vezme v úvahu náročnost procesu výroby celé hřídele a fakt, že při vyrobení rybinové drážky špatných rozměrů bude celá hřídel nepoužitelná, je jasné, že měření a kontrola musí být navržena takovým způsobem, aby byla zaručena vysoká přesnost s minimální možností jakékoli chyby.

### 4.1 Návrh a realizace měření pravoúhlé drážky

Aby byla zajištěna konečná přesnost, je zapotřebí adekvátní kontroly důležitých rozměrů, ve všech fázích výrobního procesu rybinové drážky.

První rozměrová kontrola musí potvrdit správné zhotovení pravoúhlé drážky vyrobené kotoučovou frézou. Důležitými parametry jsou v tomto případě, nejen šířka a hloubka drážky ale také její umístění v předem odvrtné díře v hlavici vřetena. Kdy je nutné zajistit, aby měla drážka požadované rozměry, a zároveň ležela přesně ve středu hlavice vřetena. Kontrolované rozměry lze vidět na následujícím obrázku.



Obr. č. 5.1 – Návrh měření pravoúhlé drážky

Šířka drážky se běžně kontroluje buďto posuvnými měřítky, nebo mikrometrickými odpichy. Vzhledem k vysoké požadované přesnosti byl v tomto případě použit právě mikrometrický odpich, který zaručí přesnost šířky s přesností na 0,01 mm. Šířka pravoúhlé drážky je předepsaná na výkrese hodnotou 281,97 mm. Zápis z měření a stanovení nejistoty typu A, lze vyčíst z následující tabulky.



Tabulka č. 7 – Měření šířky pravoúhlé drážky [12]

$n_i$	$b_i$ [mm]	$\bar{b}$ [mm]	$\Delta i$ [mm]	<b>Výběrový aritmetický průměr:</b> $\bar{b} = \frac{\sum_i^n b_i}{n} = \frac{2818,76}{10} = 281,86 \text{ mm} \quad (5.1)$
1	281,79	281,86	-0,086	
2	281,83		-0,046	<b>Směrodatná odchylka:</b> $S_{(\bar{b})} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\Delta i)^2}{n \cdot (n - 1)}} \cdot k = \sqrt{\frac{0,045}{10 \cdot (10 - 1)}} \quad (5.2)$
3	281,97		0,094	
4	281,9		0,024	$S_{(\bar{b})} = u_{Ab} \cong 0,0225 \text{ mm} \quad (5.2)$
5	281,75		-0,126	
6	281,92		0,044	<b>Zápis výsledku:</b> $b = (281,86 \pm 0,0225) \text{ mm} \quad p = 68\% ; k = 1$
7	281,85		-0,026	
8	281,89		0,014	
9	281,96		0,084	
10	281,9		0,024	

Pro stanovení výsledného rozměru je dále zapotřebí určit nejistotu typu B, tu je možno v tomto případě určit jako přesnost mikrometru (která je u mikrometrického odpichu 0,01 mm), dělenou odmocninou ze tří.

$$u_{Bb} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 5,8 \cdot 10^{-3}$$

Kde:  $u_{Bb}$  ... Nejistota typu B

Kombinovaná standartní nejistota se pak vyjádří jako:

$$u_{cb} = \sqrt{u_{Ab}^2 + u_{Bb}^2} = \sqrt{0,0225^2 + 0,0058^2} = 0,023 \text{ mm}$$

Kde:  $u_{cb}$  ... kombinovaná standartní nejistota

$u_{Ab}$  ... nejistota typu A

$u_{Bb}$  ... nejistota typu B

Rozšířená nejistota, pro zvýšení pravděpodobnosti že výsledek leží v dané toleranci, je dána vztahem:

$$u_b = k \cdot u_{cb} = 2 \cdot 0,023 = 0,046 \text{ mm}$$

Kde:  $u_b$  ... rozšířená nejistota

$u_{cb}$  ... kombinovaná standartní nejistota

$k$  ... koeficient pravděpodobnosti

Výsledek měření šířky rybinové drážky:

$$b = (281,86 \pm 0,046) \text{ mm} \quad p = 95\% ; k = 2$$

Vzhledem k tomu, že na výkrese není pro daný rozměr předepsána žádná tolerance, vztahuje se na něj tolerance popsána v následující tabulce.

Tabulka č. 8 – Mezní úchytky délkových netolerovaných rozměrů [13]

Třída přesnosti		Mezní úchytky pro základní rozsah rozměrů [mm]							
Označení	Název	do 3	přes 3 do 6	přes 6 do 30	přes 30 do 120	přes 120 do 400	přes 400 do 1000	přes 1000 do 2000	přes 2000 do 4000
f	jemná	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	-
m	střední	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	$\pm 2$
c	hrubá	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 4$
v	velmi hrubá	-	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 8$

Jak je vidět z naměřených výsledků, šířka rybinové drážky odpovídá požadavkům i pro nejvyšší třídu přesnosti, kdy daný má rozměr toleranci  $\pm 0,2$  mm.

Dalším důležitým parametrem je hloubka vyfrézované pravoúhlé drážky. Spodní plocha drážky se frézuje pouze kotoučovou frézou, což znamená, že se v případě této plochy jedná o dokončovací operaci, a je nutno jí provést s náležitou přesností a stejně tak její kontrolu. Tento rozměr by bylo možno zkontrolovat jako hloubku drážky, ale v případě, že je drážka vedena po kružnici, je lepší jej kontrolovat jako průměr této kružnice. Na tento rozměr nejsou na výkrese kladeny nijak vysoké požadavky a nevztahuje se na něj žádná zvláštní tolerance. Měření bylo opět provedeno pomocí mikrometrického odpichu a výsledky měření, spolu s vypočtenou nejistotou typu A, jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tabulka č. 9 – Měření hloubky rybinové drážky [12]

$n_i$	$D_i$ [mm]	$\bar{D}$ [mm]	$\Delta i$ [mm]	<b>Výběrový aritmetický průměr:</b> $\bar{D} = \frac{\sum_i^n D_i}{n} = \frac{6849,91}{10} = 684,99 \text{ mm} \quad (5.3)$ <b>Směrodatná odchylka:</b> $S_{(\bar{D})} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\Delta i)^2}{n \cdot (n-1)}} \cdot k = \sqrt{\frac{0,061}{10 \cdot (10-1)}} \quad (5.4)$ $S_{(\bar{D})} = u_{AD} \cong 0,025 \text{ mm} \quad (5.5)$ <b>Výsledný rozměr:</b> $D = (684,99 \pm 0,025) \text{ mm} \quad p = 68\% ; k = 1$
1	685,04	684,99	0,05	
2	685,1		0,11	
3	684,88		-0,11	
4	684,91		-0,08	
5	684,97		-0,02	
6	685,02		0,03	
7	684,96		-0,03	
8	684,9		-0,09	
9	685,01		0,02	
10	685,12		0,13	

Při použití mikrometrického odpichu stejné přesnosti jako v případě měření šířky pravoúhlé drážky bude mít nejistota typu B také stejnou hodnotu, tedy 0,0058 mm. Rozšířenou nejistotu pak lze opět stanovit vztahem:

$$u_D = k \cdot u_{cD} = k \cdot \sqrt{u_{AD}^2 + u_{BD}^2} = 2 \cdot \sqrt{0,025^2 + 0,0058^2} = 0,051 \text{ mm}$$

Kde:  $u_D$  ... rozšířená nejistota

$u_{cD}$  ... kombinovaná standardní nejistota

$k$  ... koeficient pravděpodobnosti

$u_{AD}$  ... nejistota typu A

$u_{BD}$  ... nejistota typu B

Výsledek měření šířky rybinové drážky:

$$D = (684,99 \pm 0,051) \text{ mm} \quad p = 95\% ; k = 2$$

Jestliže, hodnota předepsaná na výkrese je Ø685 mm, je patrné, že naměřená hodnota odpovídá požadované přesnosti a výsledná drážka má správnou hloubku.

Posledním kontrolovaným parametrem je při kontrole pravoúhlé drážky drsnost povrchu, která je na výkrese předepsána hodnotou  $R_a$  1,6. Pro kontrolu drsnosti existuje řada způsobů, od porovnávání povrchu s etalony drsnosti až po sofistikované drsnoměry, schopné měřit drsnost ve více směrech.

Pro měření drsnosti na dně rybinové drážky byl použit drsnoměr Diavite zobrazený na následující fotografii.

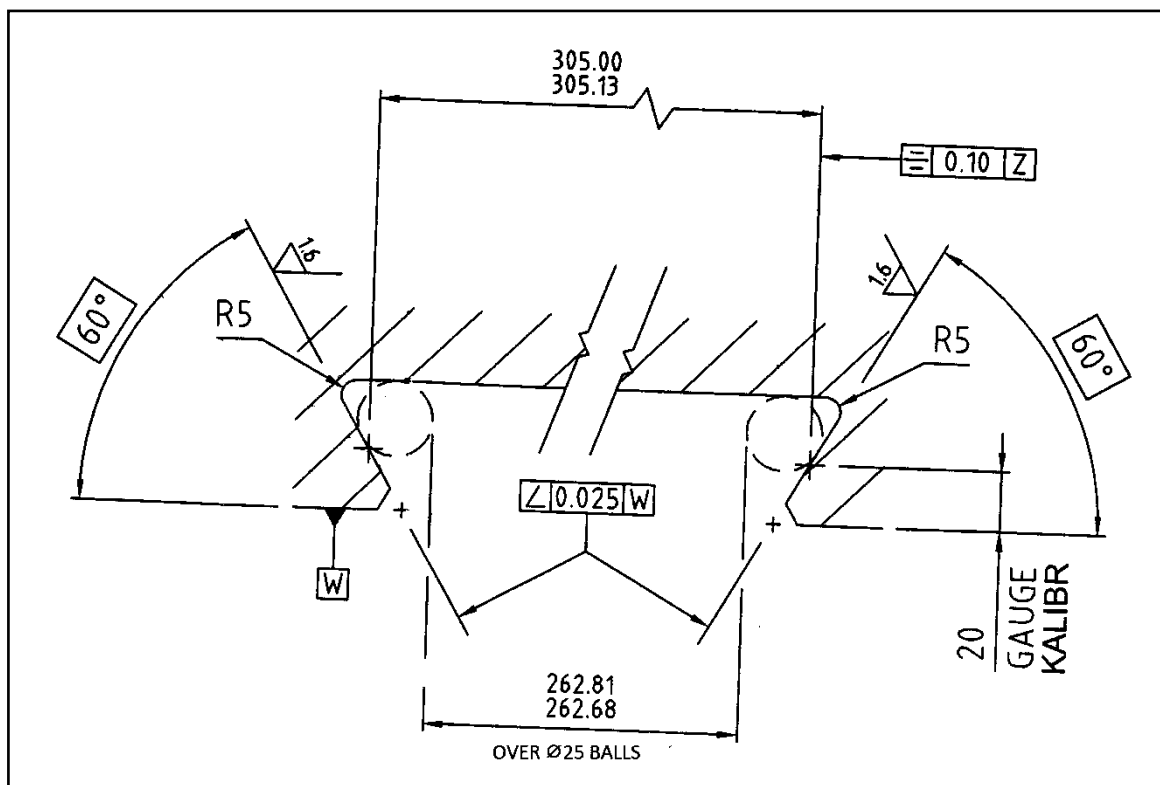


*Obr. č. 5.2 – Drsnoměr Diavite*

Při měření bylo zjištěno, že průměrná drsnost na dně rybinové drážky se shoduje s požadovanou hodnotu předepsanou na výkrese a odpovídá přibližně hodnotě  $R_a$  1,6.

#### **4.2 Návrh a realizace měření rybinové drážky – kontrola tvaru**

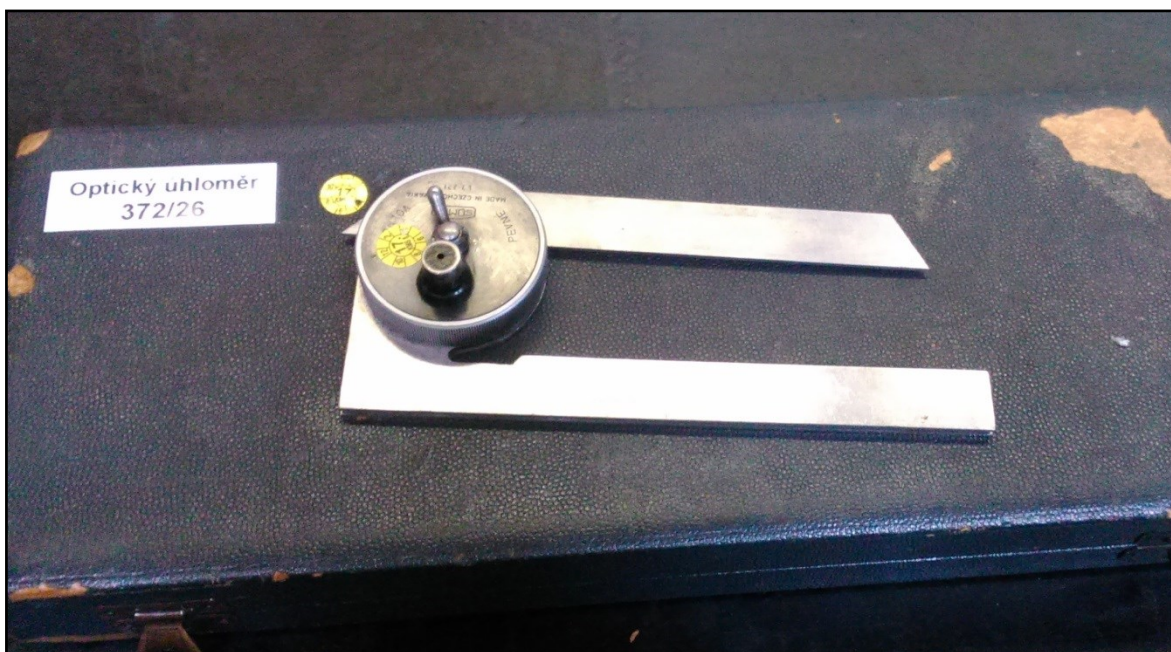
V případě konečné kontroly zhotovené rybinové drážky je nutné navrhnout způsob měření dvou klíčových parametrů. V prvním případě se jedná o sklon boků drážky a ve druhém o šířku rybinové drážky. Tyto rozměry hrají při kontrole klíčovou roli, jelikož je na ně vypsána poměrně nízká tolerance.



Obr. č. 5.3 – Kontrolované rozměry po dokončení boků rybinové drážky [10]

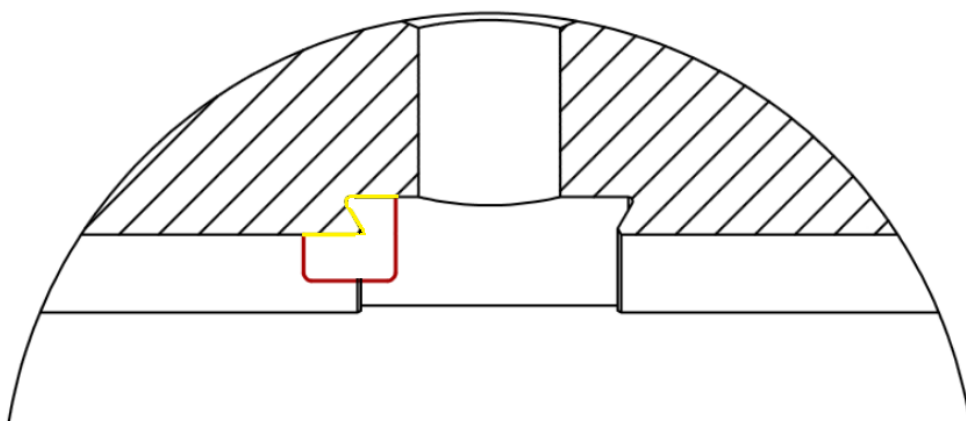
V případě prvního kontrolovaného parametru, sklonu boků rybinové drážky, bude měření provedeno dvěma způsoby. Jednak měřením přímým pomocí optického úhloměru a déle měřením nepřímým pomocí porovnání tvaru drážky s šablonou.

Optické úhloměry slouží k měření úhlů rovinných i válcových ploch. Jedná se o zařízení opatřené několika stupnicemi, které se pozorují lupou v procházejícím světle. Díky tomu můžeme určit hodnotu úhlu s přesností na 2,5'. Použitý optický úhloměr je zobrazen na následující fotografii č. 5.4.



*Obr. č. 5.4 – Optický úhloměr*

Další kontrolu představuje porovnání tvaru drážky s šablonou. Jedná se o metodu nepřímou, kdy výsledek kontroly nepředstavuje reálnou hodnotu ale pouze shodu, případně neshodu s požadovaným tvarem. Šablona je vyrobena na drátové řezačce a její přesnost je řádově vyšší než přesnost požadovaná. Tato šablona se vloží do úhlového vybrání rybinové drážky a v průhledu se zkontroluje shoda tvaru drážky s požadovaným profilem. Schéma kontroly pomocí šablony je vyobrazeno na obrázku č. 5.5, kde jsou žlutě vyznačeny hrany, které se kontrolují v průhledu.



*Obr. č. 5.5 – Kontrola tvaru drážky pomocí šablony*

Při obou kontrolách byla zjištěna shoda profilu rybinové drážky s parametrem předepsaným na výkrese.

#### **4.3 Návrh a realizace měření rybinové drážky – kontrola šířky**

U kontroly šířky rybinové drážky je návrh měření podstatně složitější, což je dáno zejména umístěním a průběhem drážky, kdy je drážka vedena po kružnici. Na výkrese je předepsaný rozměr šířky drážky 262,81 mm, v případě že měření bude provedeno přes kuličky o průměru 25 mm.

Měření přes kuličky s sebou přináší řadu úskalí, kdy největší problém je zajištění polohy kuliček v takovém stavu, aby kuličky ležely ve vybráních rybinové drážky přesně naproti sobě. Také proto se pro měření rybinových drážek v naprosté většině případů využívá metoda, tzv. přes válečky. Nicméně použitelnost metody přes válečky se omezuje především na drážky přímé.

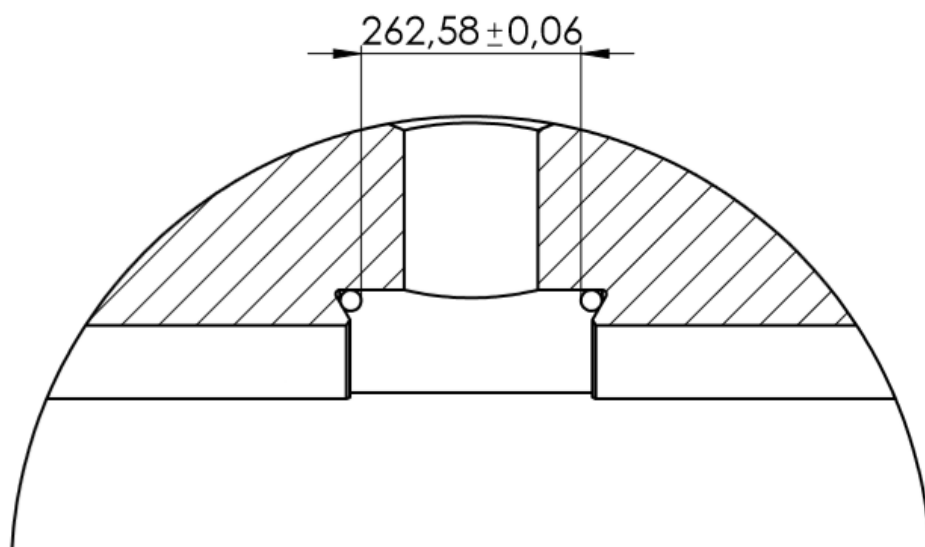
V případě použití předepsané metody a kontroly šířky drážky přes kuličky by bylo nutné navrhnout dále přípravek, který by zajistil přesnou polohu kuliček v jakémkoli místě drážky. Z toho důvodu byla snaha najít alternativní možnost měření, která by umožnila kontrolu drážky s požadovanou přesností bez nutnosti navrhovat složité přípravky.

Po konzultaci s technologi ve společnosti VHM byl navržen způsob kdy je možné pro měření použít místo kuliček válečky. Sice se v tomto případě nelze zcela vyvarovat určité chybě měření, ale její velikost bude tak malá, že jí lze zanedbat.

Jestliže se místo kuliček použijí pro měření válečky, bude potom mnohem snadnější zajistit jejich vzájemnou polohu a vyloučit tak možnost chyby způsobenou jejich ustavením. V případě že se použijí válečky o průměru 25 mm a délce 20 mm bude sice měřená vzdálenost jiná, než je předepsaná na výkrese, ale celé měření bude podstatně snadnější.

Po vymodelování celé situace při měření přes válečky, lze snadno určit požadovanou hodnotu šířky rybinové drážky.





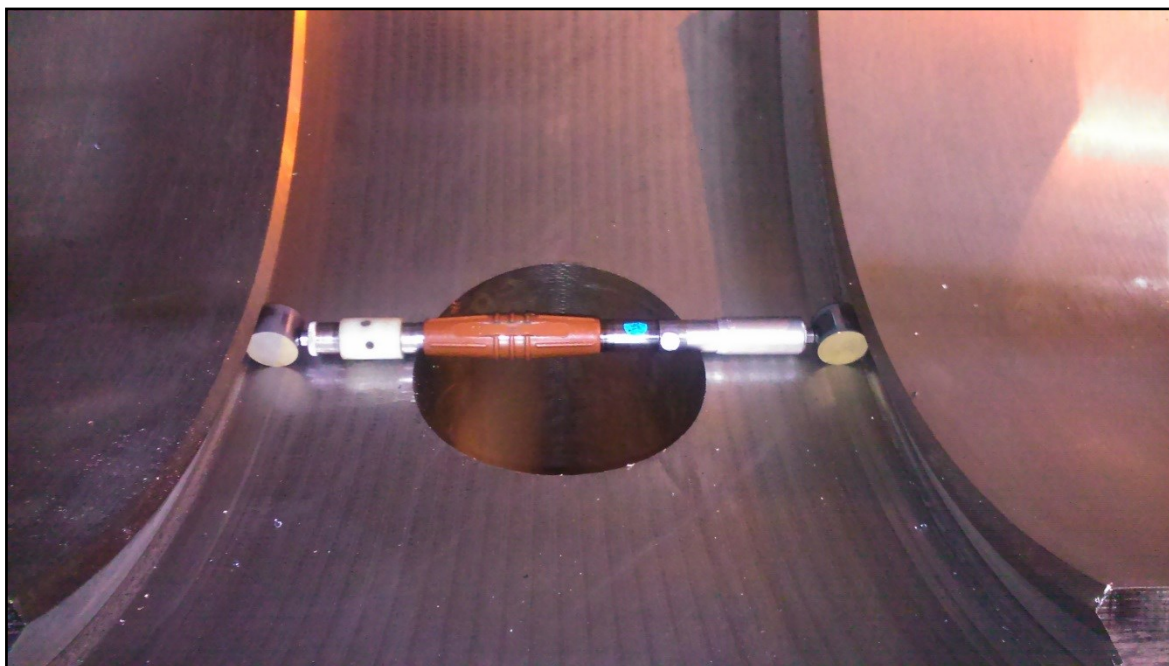
*Obr. č. 5.5 – Šířka rybinové drážky přes válečky*

Aby byla zaručena co možná nejvyšší přesnost měření, je důležité, aby použité válečky byly rozměrově co nejpřesnější. Z toho důvodu byla pro válečky použita tyčová ocel radeco o průměru 25 mm. Z této oceli se následně zhotovily dva válečky délky 20 mm.

Tyto válečky se při měření vkládaly do vybrání rybinové drážky, způsobem jaký je zobrazen na obrázku č. 5.6. Pro zajištění vzájemné polohy válečků dále nebylo třeba použití jakéhokoli dalšího přípravku.

Při následném měření byl použit opět mikrometrický odpich, který se vkládal mezi válečky, a odečítala se hodnota s přesností na setinu milimetru. Po změření hodnoty šířky drážky v daném místě, se válečky posunuly dále po kružnici rybinové drážky. Takto se měření opakovalo na deseti místech po celém obvodu drážky.





Obr. č. 5.6 – Měření šířky rybinové drážky přes válečky

Tabulka č. 10 – Měření šířky rybinové drážky přes válečky [12]

$n_i$	$a_i$ [mm]	$\bar{a}$ [mm]	$\Delta i$ [mm]	<b>Výběrový aritmetický průměr:</b> $\bar{a} = \frac{\sum_i^n a_i}{n} = \frac{2625,44}{10} = 262,54 \text{ mm} \quad (5.6)$
1	262,59	262,54	0,05	
2	262,61		0,11	<b>Směrodatná odchylka:</b> $S_{(\bar{a})} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\Delta i)^2}{n \cdot (n - 1)}} \cdot k = \sqrt{\frac{0,09}{10 \cdot (10 - 1)}} \quad (5.7)$
3	262,62		-0,11	
4	262,45		-0,08	$S_{(\bar{a})} = u_{A_a} \cong 0,03 \text{ mm} \quad (5.8)$
5	262,37		-0,02	
6	262,5		0,03	<b>Výsledný rozměr:</b> $a = (262,54 \pm 0,03) \text{ mm} \quad p = 68\% ; k = 1$
7	262,42		-0,03	
8	262,6		-0,09	
9	262,63		0,02	
10	262,65		0,13	

Při použití mikrometrického odpichu stejné přesnosti jako v předchozích případech, bude mít nejistota typu B opět stejnou hodnotu, tedy 0,0058 mm. Rozšířenou nejistotu pak lze opět stanovit vztahem:

$$u_a = k \cdot u_{c_a} = k \cdot \sqrt{u_{A_a}^2 + u_{B_a}^2} = 2 \cdot \sqrt{0,03^2 + 0,0058^2} = 0,061 \text{ mm}$$

Kde:  $u_a$  ... rozšířená nejistota

$u_{c_a}$  ... kombinovaná standardní nejistota

$k$  ... koeficient pravděpodobnosti

$u_{Aa}$  ... nejistota typu A

$u_{Ba}$  ... nejistota typu B

Výsledek měření šířky rybinové drážky:

$$a = (262,54 \pm 0,061)mm \quad p = 95\% \ ; k = 2$$

Z naměřených hodnot a následného vyhodnocení vyplývá, že rybinová drážka byla vyrobena v požadované přesnosti.

## 5 Závěry pro realizaci v praxi

Záměrem práce bylo navrhnout postup a technologii výroby a následné metrologické kontroly rybinové drážky, situované v hlavici vřetena na hřídeli pro válcovací trať. Vycházelo se ze stávajícího strojního parku společnosti Vítkovice Heavy Machinery a.s. a navrhnutý postup musel být ekonomicky hospodárný.

Nejprve byla provedena krátká rešerše současných trendů při výrobě různých typů rybinových drážek, následovaná teorií z hlediska metrologické kontroly.

Po prozkoumání současného stavu výroby různých druhů rybinových drážek ve společnosti Vítkovice Heavy Machinery, a zvážení všech možností, byly navrženy dva možné způsoby, jakými by se dalo požadovanou rybinovou drážku vyrobit při použití stávajícího strojního zařízení. Oba způsoby počítaly s využitím horizontální frézky WD 200, která má kolem sebe dostatek místa pro případnou manipulaci i s takto velkou hřídelí.

Ze dvou navržených postupů byla po konzultaci s technologií ve společnosti VHM vybrána druhá varianta, která se jeví jako příznivější možnost především z hlediska manipulace a ustavení hřídele. V tomto případě technologický postup sice vyžaduje výrobu několika nových nástrojů, a přípravku, nicméně poté lze celou rybinovou drážku obrobit na jediné ustavení obrobku, což bylo při její velikosti a celkové náročnosti manipulace a ustavení nakonec rozhodujícím faktorem.

Vzhledem k vysokým požadavkům na přesnost rybinové drážky nebylo možno pro celý proces obrábění použít pouze jednu sadu nástrojů, proto byly nakonec vyrobeny dvě sady speciálních nožů. První sada obsahovala dva velké obráběcí nože osazené přiletovanými řeznými plátky a byla určena pro hrubování úhlového vybrání, a druhá sada byly dva menší nože vyrobeny z radeco oceli a určeny pro dokončení rybinové drážky. Pro tyto dokončovací nože se dále na drátové řezačce vyrobil nástrojový držák, aby byla při obrábění zaručena jejich přesná poloha.

Dále byly ve spolupráci s technologií navrženy pro jednotlivé operace řezné podmínky takového rázu, aby byla zaručena životnost nástrojů přes celý proces obrábění a zároveň bylo dosaženo požadované přesností a jakosti obrobených ploch. Při navržených řezných podmínkách sice proces trval bezmála 35 hodin strojního času, nicméně bylo dosaženo požadovaných výsledků.

Z hlediska metrologické kontroly, bylo dále navrženo měření všech důležitých parametrů rybinové drážky, takovým způsobem aby byla zaručena přesnost měření a zároveň se zabránilo vzniku případných chyb.

Celá rybinová drážka byla zhotovena dle navržených postupů a následná metrologická kontrola ukázala, že vše bylo vyrobeno s požadovanou přesností a jakostí.

## Použitá literatura

- [1] Frézování drážek. In: *Zozei* [online]. Brno, 2012 [vid. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://zozei.sssebrno.cz/frezovani-draeek/>
- [2] FERFECKI, Artur. *Porovnání účinnosti a efektivity drážkování tradičním způsobem s technologií trochoidního obrábění*. Brno, 2012. Bakalářská práce.
- [3] LUKS, Marek. Frézování drážek. In: *Mlgeardesigns* [online]. 2015 [vid. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1504/frezovani-drazek>
- [4] Wikipedia. *Wikipedia Wolna encilkopedai* [online]. [vid. 2017-01-22]. Dostupné z: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Jask%C3%B3%C5%82czy\\_ogon.png](https://pl.wikipedia.org/wiki/Plik:Jask%C3%B3%C5%82czy_ogon.png)
- [5] Dovetail Grooving Inserts. *Modern Machine Shop* [online]. [vid. 2017-01-24]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/products/dovetail-grooving-inserts>
- [6] Flexible Dovetail Grooving System from Horn Cutting Tools: Precision and productivity based on clever design. *Horn cutting tools* [online]. [vid. 2017-01-24]. Dostupné z: <http://www.phorn.co.uk/news/newsdetail/flexible-dovetail-grooving-system-from-horn-cutting-tools/>
- [7] STAVINOHA, Zdeněk. Měření vybraných strojních součástí. In: *Mechatronika* [online]. 2014 [vid. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/?action=2&doc=44249&docGroup=-1&cmd=0&instance=2>
- [8] BRYCHTA, Josef. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3522-8.
- [9] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [10] Interní dokumentace společnosti Vítkovice Heavy Machinery a.s.
- [11] MT nástroje. *I-frezy* [online]. [vid. 2017-04-20]. Dostupné z: <https://www.i-frezy.cz/i-frezy/eshop/11-1-Tvarove-kotoucove-frezy/55-3-Oboustranne/5/1258-Freza-CSN22-2250-uhlova-oboustranna-HSS-60-x100>
- [12] PETŘKOVSKÁ, Lenka a Lenka ČEPOVÁ. *Metrologie a řízení kvality: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2771-1.

- [13] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval své rodině a přítelkyni za projevenou podporu při zpracovávání bakalářské práce. A také vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Marku Sadílkovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a odborné vedení.